

博 士 論 文

パッシブ法を用いた
室内空気質測定法に関する研究

Measurement Method for Indoor Air Quality
with Passive Means

金 勲

KIM Hoon

早稲田大学 理工学研究科 建築学専攻
建築環境研究

2009 年 2 月

パッシブ法を用いた 室内空気質測定法に関する研究

Measurement Method for Indoor Air Quality with Passive Means

2009 年 2 月

早稲田大学 理工学研究科 建築学専攻

金 勲

INDEX

目次

パッシブ法を用いた室内空気質測定法に関する研究

Measurement Method for Indoor Air Quality with Passive Means

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 シックハウス症候群	3
1.3 室内空気の汚染源と厚生労働省による指針値	5
1.3.1 厚生労働省指針値	5
1.3.2 総揮発性有機化合物 (TVOC)	7
1.3.3 厚生労働省指針値物質の性質及び発生源	8
1.3.4 その他の化学物質	11
1.4 日本の住宅における室内気中濃度の推移	14
1.4.1 厚生労働省の実態調査	14
1.4.2 国土交通省の実態調査	15
1.5 建材から発生する化学物質の放散速度測定法とフラックス発生量測定法	17
1.5.1 アクティブ測定法とパッシブ測定法	17
1.5.2 アクティブ法を用いた放散速度測定法	19
1.5.3 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法	24
1.5.4 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法の種類	27
1.5.5 本研究におけるフラックス発生量測定法	33
1.6 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法	35
1.6.1 PFT 法概要	35
1.6.2 測定原理	36
1.6.3 トレーサーガス	37
1.6.4 PFT 放散源	39
1.6.5 パッシブサンプラー	41
1.6.6 基礎理論	42
1.6.7 分析	44
1.6.8 換気量算定式	45
1.7 本論文の構成	47

第2章	パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法	53
2.1	背景と目的	53
2.2	パッシブサンプラー及び小型セルの回収率	54
2.3	EPS からのフラックス発生量測定試験	57
2.3.1	目的	57
2.3.2	試験概要	57
2.3.3	試験結果	59
2.4	接着剤からのフラックス発生量測定法の開発	65
2.4.1	目的	65
2.4.2	基材の検討	66
2.4.3	けい酸カルシウム板を用いた試験片	68
2.4.4	けい酸カルシウム板を用いた試験片の放散性能試験	70
2.5	添加量変化によるフラックス発生量測定試験	84
2.5.1	目的	84
2.5.2	試験概要	84
2.5.3	試験結果	86
2.5.4	添加量と捕集量の関係	90
2.6	養生条件と再現性	94
2.6.1	目的	94
2.6.2	試験概要	94
2.6.3	試験結果	95
2.7	まとめ	97
第3章	PFT 換気量測定法	101
3.1	背景と目的	101
3.2	本研究における PFT 換気量測定法の概要	103
3.3	PFT 放散源の開発及び放散量の温度依存性実験	105
3.4	パッシブサンプラー	113
3.5	サンプリングレート算出実験	114
3.6	誤差評価手法を用いた換気量算出式の検討	120
3.7	まとめ	123
第4章	パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF₆ 法、CO₂ 法、差圧測定法の 周期変動条件下における比較実験	127
4.1	背景と目的	127
4.2	PFT 法概要	128
4.3	実験概要	129

4.3.1	実験対象住宅	129
4.3.2	実験条件	132
4.3.3	測定法概要	134
4.3.4	差圧測定結果を用いた計算の概要	138
4.4	測定結果	139
4.4.1	条件 1 (0.86 回/h、24 時間北正圧)	141
4.4.2	条件 2 (0.47 回/h、24 時間北正圧)	142
4.4.3	条件 3 (0.47 回/h、12 時間北正圧、12 時間南正圧)	143
4.4.4	条件 4 (0.47 回/h、2 時間周期に正圧の方向変動)	144
4.4.5	各測定法の比較	145
4.5	PFT 法が含む理論誤差	146
4.6	考察	149
4.7	まとめ	151
第 5 章	多数室を有する戸建住宅における換気量測定	155
5.1	背景と目的	155
5.2	測定法概要	157
5.2.1	温湿度測定	157
5.2.2	PFT 法を用いた換気量測定法	158
5.2.3	SF ₆ を用いた換気量測定法	159
5.2.4	CO ₂ を用いた換気量測定法	159
5.2.5	風量測定による換気量測定法	160
5.2.6	風速・風向測定	160
5.3	2 階建戸建住宅における換気量測定	161
5.3.1	目的	161
5.3.2	実測概要	162
5.3.3	測定法概要	164
5.3.4	測定結果	167
5.3.5	測定結果まとめ	177
5.4	同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸における換気量測定	179
5.4.1	目的	179
5.4.2	実測概要	180
5.4.3	測定法概要	183
5.4.4	温湿度測定結果	186
5.4.5	気密測定結果	186
5.4.6	風量測定結果	187
5.4.7	住戸 A における換気量測定結果	189

5.4.8	住戸 A における各測定法の測定結果の比較	196
5.4.9	住戸 B における換気量測定結果	199
5.4.10	測定結果まとめ	201
5.5	工業地域の集合住宅における多数室換気量測定	202
5.5.1	目的	202
5.5.2	1 次実測概要	202
5.5.3	1 次実測測定法概要	206
5.5.4	1 次実測測定結果	208
5.5.5	2 次実測概要	215
5.5.6	2 次実測測定法概要	216
5.5.7	2 次実測測定結果	218
5.5.8	1 次実測と 2 次実測の PFT 換気量測定結果の比較	230
5.5.9	測定結果まとめ	231
5.6	3 階建戸建住宅における換気量測定	233
5.6.1	目的	233
5.6.2	実測概要	233
5.6.3	測定法概要	237
5.6.4	1 次実測結果	240
5.6.5	2 次実測結果	252
5.6.6	1 次実測及び 2 次実測の測定結果まとめ	262
5.7	全実測における PFT 法換気量測定結果と他の換気量測定結果の比較	266
5.8	まとめ	268
第 6 章	パッシブ法を用いた韓国の新築集合住宅における空気質実態調査	275
6.1	背景と目的	275
6.2	実測概要	277
6.2.1	実測項目	280
6.2.2	測定法概要	282
6.3	実測結果	285
6.3.1	温湿度	285
6.3.2	気中濃度	287
6.3.3	フラックス発生量	291
6.3.4	換気量	297
6.4	まとめ	298
第 7 章	総括	301

Appendix

記号一覧

図表一覧

研究業績

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

室内空間の有害化学物質汚染に起因するシックハウス症候群（Sick House Syndrome）或いはシックビルディング症候群（Sick Building Syndrome）と呼ばれる症状が社会問題となっている¹⁾。

シックハウスの定義に関しては、様々なものがあるが、厚生労働省の参考定義²⁾によると以下のようになっている。「住宅の高気密化や化学物質を放散する建材・内装材の使用等により、新築・改築後の住宅やビルにおいて、化学物質による室内空気汚染等により、居住者の様々な体調不良が生じている状態が、数多く報告されている。症状が多様で、症状発生の仕組みをはじめ、未解明な部分が多く、また様々な複合要因が考えられることから、シックハウス症候群と呼ばれる。」また、建材や換気不足のみではなく現代のライフスタイルにも通じる問題である。

シックハウスの症状としては、目がちかちかする、吐き気、だるさ、目眩、頭痛、鬱、咳が出る、手足の冷えなどが報告されているが、アレルギー症状や化学物質過敏症にまで発展することもある。

日本では1996年に国会で取り上げられて以降、社会的に大きな関心が示されてきた。厚生労働省「シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会」^{3)~7)}により、13物質に対する気中濃度指針値が定められている。更に、2003年7月には改正建築基準法が施行された。シックハウス症候群対策の基本となるのは有害化学物質の放散が少ない建材を使用する「発生源対策」と適切な換気量を確保する「換気対策」である⁸⁾ため、改正建築基準法によりホルムアルデヒド放散建材の使用面積制限、クロルピリホス使用の全面禁止、必要換気量確保のための換気設備の設置が義務化された。

しかし、建築基準法が改正された後もシックハウス問題は発生しており、完全に解消できたわけではない。また、室内化学物質汚染のみではなく、カビ・ダニなどの微生物汚染、臭気、空気の停滞による不快感など、室内空気環境の悪化が懸念されている。これらは、適切な換気を行わないと解決し難い問題である。

室内空気質評価のためには気中濃度、建材からの放散量、換気量を把握することが重要である。

その測定法としては吸引ポンプを始め、清浄空気発生装置、流量調節装置等の機器装置を用いるアクティブ法と電動系の機器を使わずパッシブ拡散サンプラーと呼ばれる捕集管を用いるパッシブ法がある。

気中濃度測定には吸引ポンプを用いたサンプリング法、放散量測定にはダイナミックヘッドスペース法として JIS (Japanese Industrial Standards : 日本工業規格) A 1901^{9) 10)}と ISO (the International Organization for Standardization : 国際標準化機構) 16000-9¹¹⁾で定められたチャンバー法、一方換気量測定には SF₆ (六フッ化硫黄)、CO₂ (二酸化炭素) 等のトレーサーガスを用いる測定法^{12) 13) 14)}がよく用いられている。これらはアクティブ法と呼ばれ、精密な測定ができるが機械装置を必要とする。このような装置は高価で、装置が大掛かりであるため労力を必要とする。また、操作に専門知識が必要であり、維持管理にも手間と費用がかかる。そのため、実際の現場や住宅における実状を把握するなど、作業量を削減しなるべく簡便に行う必要がある大規模な実態調査は難しい。

このような背景で、本研究では現場や実住宅における室内空気環境を、機器が不要で、精度及び再現性を確保しながら騒音などがなく簡便に測定ができる手法の提案と開発を目的とし、パッシブサンプラーを使用する気中濃度測定法、建材からの化学物質放散量測定法 (Passive Flux Method : フラックス発生量測定法)¹⁵⁾、PFT (Perfluorocarbon Tracergas) を用いた換気量測定法に関する研究^{16)~21)}を行った。また、提案した手法を用いて実住宅における空気質測定を行った。

1.2 シックハウス症候群

現代人は、その 90%以上の時間を室内で過ごしている。物質量として、食事や飲み物などの飲食物より、体の中に取り入れている最も多い物質は空気である。

近年、室内空間の有害化学物質汚染に起因するシックビルディング症候群（Sick Building Syndrome）或いはシックハウス症候群（Sick House Syndrome）と呼ばれる症状が社会問題となっている。

シックハウスの主な原因は「建材や生活用品から放散される化学物質」と「換気不足」である。化学物質は数え切れないほど多い種類が存在するが、シックハウスの原因物質として最初に注目されたのは VVOCs と VOCs の一部物質である。

揮発性有機化合物は表 1-1 のように沸点によって分類される。

表 1-1 沸点による有機化合物の分類 ¹⁾

名 称	略称	沸点範囲 ()
高揮発性有機化合物	VVOC	< 0 50-100
揮発性有機化合物	VOC	50-100 ~ 240-260
準揮発性有機化合物	SVOC	240-260 ~ 380-400
粒子状物質	POM	> 380

高揮発性有機化合物（VVOC）に属する代表的な物質としてはホルムアルデヒドとアセトアルデヒドがある。また、揮発性有機化合物（VOC）に属する物質としては、ベンゼン、トルエン、キシレン、スチレン、エチルベンゼンなどがある。準揮発性有機化合物（SVOC）に関しては、可塑剤であるフタル酸ジオキシル（DOP）、リン酸トリブチル（TBP）や有機リン系農薬の一部が含まれる。粒子状物質（POM）としては、リン酸トリクレシル（TCP）、殺虫剤、防蟻剤に用いられるクロルピリホス、ホキシム、ピリダフェンチオンなどがある。

VOCs は、多岐に渡る用途で使われ、接着剤溶剤、ペイント、ラッカー、防水剤等の溶剤、ワックス等様々なものに利用されている。VOCs は人工的な化学薬品・樹脂類からのみ放散されるわけではなく、天然木材からは α -ピネン、 β -ピネン、リモネンなどのテルペン系炭化水素が多く放散されている。人体もまた放散源の一つであり、新陳代謝の過程における老廃物として呼気・発汗等からの放散が確認されている。

WHO（World Health Organization：世界保健機関）が化学的性質により VOCs を 7 種類に分類している（表 1-2）。個々の化合物の濃度は、それらが属する属性の全濃度の 50%を超えてはならない。また TVOC 濃度の 10%を超えてもならない。目標値の合計は $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ である。

表 1-2 WHO による VOCs の分類^{22) 23)}

VOC の分類	濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
アルカン	100
芳香族炭化水素	50
テルペン	30
ハロカーボン	30
エステル	20
アルデヒド・ケトン	20
その他	50
目標値の合計(TVOC)	300

室内空気汚染問題には、内装材のみではなく室内における燃焼器具からの窒素酸化物、 CO_2 や CO 、カビ・ダニなどの微生物、化粧品や消臭剤などの日常的なものなど、多種多様なものが原因となっている。中でも、シックハウス症候群の原因物質としてはホルムアルデヒドや VOCs といった化学物質が注目されてきた。これらは、工業化による新建材からの化学物質放散や、施工性の高さから溶剤系の接着剤や塗料などを現場で使用するものが原因だと考えられる。

1.3 室内空気の汚染源と厚生労働省による指針値

1.3.1 厚生労働省指針値

2000年4月より開催された厚生労働省の「シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会」において、実態調査結果やこれら検討結果、関連した知見等をもとに、室内濃度指針値の策定が進められた^{3)~7)}。2002年までに13物質について表1-3に示す室内濃度指針値が定められた。

指針値とは「通常この濃度以下であればヒトが一生涯に渡って曝露しても、健康影響が現れないと推定される値」である。但し、遺伝的或いは後天的要因、感受性などの個人差による特殊な事情がある場合には、指針値以下であっても影響が現れる可能性はある。

表 1-3 室内気中濃度指針値

（厚生労働省シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書 2002）

揮発性有機化合物*	毒性指標	室内濃度指針値	設定日
ホルムアルデヒド	ヒト吸入曝露における鼻咽頭粘膜への刺激	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)	1997. 6.13
アセトアルデヒド (1)(2)	ラットの経気道曝露における鼻腔嗅覚上皮への影響	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03ppm)	2002. 1.22
トルエン(1)(2)	ヒト吸入曝露における神経行動機能及び生殖発生への影響	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)	2000. 6.26
キシレン(1)(2)	妊娠ラット吸入曝露における出生児の中枢神経系発達への影響	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20ppm)	2000. 6.26
パラジクロロベンゼン(1)(2)	ビーグル犬経口曝露における肝臓及び腎臓等への影響	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2000. 6.26
エチルベンゼン (1)(2)(3)	マウス及びラット吸入曝露における肝臓及び腎臓への影響	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88ppm)	2000.12.15
スチレン(1)(2)	ラット吸入曝露における脳や肝臓への影響	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05ppm)	2000.12.15
テトラデカン(2)(6)	C ₈ -C ₁₆ 混合物のラット経口曝露における肝臓への影響	330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2001. 7. 5
クロルピリホス (4)(5)	母ラット経口曝露における新生児の神経発達への影響及び新生児脳への形態学的影響	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppb) 但し小児の場合は 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.007ppb)	2000.12.15
フタル酸ジ-n-ブチ	母ラット経口曝露における新生児の	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)	2000.12.15

ル(1)(3)(5)	生殖器の構造異常等の影響		
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル(3)(5)	ラット経口曝露における精巣への病理組織学的影響	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.6ppb) 注1	2001. 7. 5
ダイアノジン(4)(5)	ラット吸入曝露における血漿及び赤血球コリンエステラーゼ活性への影響	0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppb)	2001. 7. 5
フェノブカルブ(3)(5)	ラットの経口曝露におけるコリンエステラーゼ活性などへの影響	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.8ppb)	2002. 1.22
総揮発性有機化合物量(TVOC)(1)(3)	国内の室内 VOC 実態調査の結果から、合理的に達成可能な限り低い範囲で決定	暫定目標値 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2000.12.15

注1：フタル酸ジ-2-エチルヘキシルの蒸気圧については $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ (25) $\sim 8.6 \times 10^{-4} \text{Pa}$ (20) など
多数の文献値があり、これらの換算濃度はそれぞれ 0.12 \sim 8.5ppb 相当である。

注2：* 番号は各物質の選定理由を示す。

- (1) 海外で指針が提示されているもの
- (2) 実態調査の結果、室内濃度が高く、その理由が室内の発生源によると考えられるもの
- (3) パブリックコメントから特に要望のあったもの
- (4) 外国で新たな規制がかけられたこと等の理由により、早急に指針値策定を考慮する必要があるもの
- (5) 主要な用途からみて、万遍なく網羅していること
- (6) 主要な構造分類からみて、万遍なく網羅していること

1.3.2 総揮発性有機化合物 (TVOC)

TVOC とは Total Volatile Organic Compounds (総揮発性有機化合物) の略称で、多くの化学物質の総称である VOCs を評価するための指標である。TVOC 濃度の人体への影響を表 1-4 に示す。

表 1-4 TVOC 濃度の人体影響 (ECA, 1992).

TVOC 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	分類	健康への影響
< 200	快適範囲	刺激も不快感も感じない
200-300	問題の生じる 可能性あり	何らかの影響を引き起こす可能性はかなり低い
300-3000		様々な物質への曝露が相互に影響しあう場合、炎症・不快感が生じる可能性がある
3000-5000	不快範囲	においも検知され、居住者からの苦情が起こる
5000-8000		目・鼻・喉の炎症が起こるなど、生理的な影響が見受けられる
8000-25000		頭痛が起こる可能性がある
25000 <	毒性範囲	頭痛よりも神経毒的な影響が起こる可能性がある

ECA Report 11 : Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings

毒性学的知見に基づいた TVOC 指針値設定は現時点では困難であるが、室内空気質の TVOC 暫定目標値を $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ としている。TVOC 暫定目標値は、毒性学的知見から決定したものではないため、個別の VOC 指針値とは独立に扱われなければならない。

個別 VOC 指針値はリスク評価に基づいた健康指針値であり、その濃度以下であれば通常の場合その VOC は健康への悪影響は起さないと推定された値である。しかし、その濃度以下であればその空気質が快適で安全ということではなく、実際には複数の VOCs が存在する。従って個別 VOC 指針値と TVOC 暫定目標値は、それぞれ独立して扱われるべきである。

測定された TVOC 値が暫定目標値を超える結果が得られた場合には、測定時期や、その中に含まれる物質の種類や由来を確認した上で、個々の良否の評価を行うべきである。天然材を用いた住宅のような場合は、テルペン類等の天然成分が高濃度で検出される可能性があるため、特定成分に対する考慮も必要である。

1.3.3 厚生労働省指針値物質の性質及び発生源

日本厚生労働省により指針値が策定されている13物質に関する一般的な性質^{24) 25)}を表1-5に示す。また、物質用途及び室内発生源を①～⑬にて説明する^{24) 25) 26)}。

表 1-5 一般的な性質^{24) 25)}

物 質 名	性 質	分子量	蒸気圧	蒸気密度
ホルムアルデヒド	無色で刺激臭 常温ではガス体	30.03	-	1.07
アセトアルデヒド	無色で刺激臭 常温では液体	44.1	98.6kPa	1.5
トルエン	無色でベンゼン様の芳香 常温では可燃性の液体	92.13	2.9kPa	3.1
キシレン	無色でベンゼン様の芳香 常温では可燃性の液体	106.16	1.3kPa (1)	3.7
パラジクロロベンゼン	無色又は白色の結晶 特有の刺激臭 常温で昇華する	147.01	0.17kPa	5.1
エチルベンゼン	無色でベンゼン様の芳香 常温では可燃性の液体	106.16	0.9kPa	3.7
スチレン	無色又は黄色で特徴的な臭気 常温では油状の液体	104.14	0.7kPa	3.6
テトラデカン	無色で石油臭 常温では液体	198.39	0.18kPa	6.8
クロルピリホス	無色の結晶 揮発性はかなり低い、残効性 がある	350.6	2.5×10^{-6} kPa	12
フタル酸ジ-n-ブチル	無色～微黄色で特徴的な臭気 常温では粘ちょう性の液体	278.3	0.01kPa 未満	9.6
フタル酸ジ-2-エチル ヘキシル	無色～淡色で特徴的な臭気 常温では可燃性の液体	390.5	0.001kPa	13.45
ダイアジノン	無色で弱いエステル臭 常温ではやや粘ちょう性の 液体	304.35	1.2×10^{-6} kPa	10.5
フェノブカルブ	無色結晶 わずかな芳香臭	207.3	1.6mPa	7.1

1) 0.8-2.2kPa の混合

ホルムアルデヒド

水によく溶け、35～37%の水溶液はホルマリンとして知られている。長期症状としては変異原性（発癌性）がある。合板、パーティクルボード、壁紙用接着剤等に用いられる尿素（ユリア）系、メラミン系、フェノール系等の合成樹脂や接着剤の原料となるほか、一部ののり等の防腐剤や繊維の縮み防止加工剤等、さまざまな用途の材料として用いられている。室内空気汚染の主な原因として推定されるのは、合板や内装材等の接着剤として使用されているユリア系、メラミン系、フェノール系等の接着剤からの放散（未反応物もしくは分解物）である。建材だけでなく、これらを使用した家具類も同様である（木製家具、壁紙、カーペット等）。また、喫煙や、石油やガスを用いた暖房器具の使用によっても発生する可能性がある。

アセトアルデヒド

揮発性が高い。慢性アルコール中毒様症状に加え変異原性がある。アセトアルデヒドはエタノールの酸化により生成され、ヒト及び高等植物における中間代謝物でもあるため、様々な食物やアルコールを含むもの、またヒトそのものも発生源になり得る。喫煙により発生することも知られている。ホルムアルデヒドと同様に一部の接着剤や防腐剤に使用されている他、写真現像用の薬品としても使用される。

トルエン

揮発性が高い。トルエンは接着剤や塗料の溶剤及び希釈剤等として、通常は他の溶剤と混合して用いられる。アンチノッキング剤として、ガソリン中に添加されることがある。室内空気汚染の主な原因としては、内装材等の施工用接着剤、塗料等からの放散である。

キシレン

揮発性が高い。市販品は *o*-, *m*-, *p*- の混合物である。キシレンは接着剤や塗料の溶剤及び希釈剤等として、通常は他の溶剤と混合して用いられる。キシレンの市販品は通常エチルベンゼンも含んでいる。トルエンと同様、ガソリンのアンチノッキング剤として添加されることがある。室内空気汚染の主な原因として推定されるのは、内装材等の施工用接着剤、塗料等からの放散である。

パラジクロロベンゼン

パラジクロロベンゼンは家庭内では衣類の防虫剤やトイレの芳香剤等として使用されている。

エチルベンゼン

揮発性が高い。接着剤や塗料の溶剤及び希釈剤等として、また燃料油に混和して、通常は他の溶剤と混合して用いられる。

スチレン

スチレンはポリスチレン樹脂、合成ゴム、不飽和ポリエステル樹脂、ABS樹脂、イオン交換樹脂、合成樹脂塗料等に含まれる高分子化合物の原料として用いられている。これらの樹脂を使用

しているもの（断熱材、浴室ユニット、畳心材等の他様々な家具、包装材等）に未反応のモノマーが残留していた場合には、室内空気中に揮散する可能性がある。

テトラデカン

揮発性は他の溶剤と比べると低い。工業的に灯油留分をさらに精製して生産されているため、灯油は主要な発生源になり得る。また、塗料等の溶剤に使用されることがある。

クロルピリホス

有機リン系であり前述した他の化合物に比べると揮発性は低く、残効性がある。クロルピリホスは家庭内では防蟻剤として使用されている。

フタル酸ジ-n-ブチル

フタル酸ジ-n-ブチルは主に塗料、顔料や接着剤に、加工性や可塑化効率の向上のために使用されている。

フタル酸ジ-2-エチルヘキシル

常温ではほとんど揮発せず、吸着性が強く固体表面などに吸着する。フタル酸ジ-2-エチルヘキシルは代表的な可塑剤として、壁紙、床材、各種フィルム、電線被覆等様々な形で汎用されている。

ダイアジノン

揮発性は低い。長期的にはコリンエステラーゼ阻害剤として作用し、影響が蓄積される可能性がある。有機リン系殺虫剤として、殺虫剤・防虫剤（シロアリ防除剤）に用いられる。農薬、防疫用薬剤として用いられるが農業以外の屋外使用は禁止されている。

フェノブカルブ

揮発性は低い。長期的にはコリンエステラーゼ阻害剤として作用し、影響が蓄積される可能性がある。フェノブカルブは水稻、野菜などの害虫駆除に用いられるが、家庭内では防蟻剤として用いられている。防蟻剤用として特化した製品は、高濃度で揮発しないようマイクロカプセル化されており、土壌に適切に処理された場合、室内への放散は低いものと考えられる。

1.3.4 その他の化学物質

室内に存在する可能性のある化学物質は前述の物質だけではない。基本的に全ての物質は化学物質であり、我々の生活はこれら化学物質のおかげで成り立っている。これらの極めて多種多様にわたる化学物質を網羅するのは不可能ではあるが、室内に存在する可能性のある物質について族別に分類して表 1-6 に示す。

このように、室内空気中には非常に多くの有機性室内空気汚染化学物質が存在し、これらは沸点によっては表 1-1 のように分類される。

表 1-1 の分類によると、ホルムアルデヒドは高揮発性有機化合物 (VVOC) に属する代表的な物質である。また、揮発性有機化合物 (VOC) に属する物質としては、トルエン、キシレン、ベンゼン、スチレンなどである。準揮発性有機化合物 (SVOC) としては、可塑剤に含まれるフタル酸ジオクチル (DOP)、リン酸トリブチル (TBP) や有機リン系農薬の一部がある。粒子状物質としては、リン酸トリクレシル (TCP)、殺虫剤、防蟻剤に用いられるクロルピリホス、ホキシム、ピリンフェンチオンなどがある。

厚生労働省では、代表的物質群別に揮発性の有機化合物約 40 種について 1997 年及び 1998 年に実態調査を行い「居住環境中における揮発性有機化合物の全国実態調査」として、1999 年 12 月に結果を公表した。40 物質の中には、一般に建材そのものや施工等に人為的に使用されているとされる物質だけではなく、 α -ピネンやリモネンの様に木材や果物からの放散が主であろうと考えられる物質や、パラジクロロベンゼンのように生活行為により発生すると考えられる物質、更には、通常建材や日用品等には使用されず、室内が発生源ではないと考えられる物質も含まれている。

ただし、これらの物質はヒトに対して必ずしも毒性を考慮して選定されたものではないため、存在していることが即問題であるというわけではないことに注意する必要がある。

表 1-6 族別分類

脂肪族 炭化水素	ヘキサン	ハロゲン類	ジクロロメタン
	ヘプタン		トリクロロエチレン
	オクタン		テトラクロロエチレン
	ノナン		クロロホルム
	デカン		1,1,1-トリクロロエタン
	ウンデカン		1,2-ジクロロエタン
	ドデカン		1,2-ジクロロプロパン
	トリデカン		p-ジクロロベンゼン
	テトラデカン		四塩化炭素
	ペンタデカン		クロロジブロモメタン
	ヘキサデカン	テルペン類	α-ピネン
	2,4-ジメチルペンタン		リモネン
	2,2,4-トリメチルペンタン	エステル類	酢酸エチル
			酢酸ブチル
芳香族 炭化水素	ベンゼン	アルデヒド ケトン類	アセトン
	トルエン		メチルエチルケトン
	エチルベンゼン		メチルイソブチルケトン
	m,p-キシレン		ノナナール
	o-キシレン		デカナール
	スチレン		
	1,3,5-トリメチルベンゼン		
	1,2,4-トリメチルベンゼン		
	1,2,3-トリメチルベンゼン		
	1,2,4,5-テトラメチルベンゼン		
アルコール 類	エタノール		
	n-ブタノール		

族別の特徴は下記の通りである。

脂肪族炭化水素

溶剤等に用いられる。ベンジンや石油類を持ち込めば当然発生する。また、ドライクリーニングの溶剤として使われているものもある。

芳香族炭化水素

芳香族化合物の内の幾つかは優先物質にも入っているが、塗料や接着剤の溶剤等に広く使用されている。また、トリメチルベンゼンの一部は、染料、油性ニス、印刷インキ原料等に使用されている可能性がある。

ハロゲン類

脱脂能力が高く、溶剤として用いられるが、基本的に工業用である。一部クリーニング溶剤として用いられる可能性がある。

テルペン類

代表的天然成分で木質建材には必ず含まれ、柑橘類などにも多量に含まれている。香料や天然系溶剤、接着剤等としても用いられている。

エステル類

樹脂、ラッカー、インキ等の溶剤として幅広く用いられる可能性があるほか、一部香料としても用いられる。酢酸エチルはメロン臭として有名であり、実際メロンに含まれている。

アルコール類

塗料やラッカーの溶剤として用いられることが多い。この他に、メタノール（ラッカー溶剤等）、エタノール（溶剤、除菌スプレー、消臭剤、酒等多岐）等が存在している可能性が高い。特に一般家庭におけるエタノールの存在量は他と比較して高い。

アルデヒド類

一部香料や防腐剤に用いられているものがある。アルコールの酸化で生じるので二次的発生もあり得る。ホルムアルデヒドやアセトアルデヒド等、炭素鎖の短いものは一般に VOC に分類されないのでリストにない。ホルムアルデヒドは前記の通りであり、アセトアルデヒドは防カビ剤や香料にも用いられる。エタノールは体内でアセトアルデヒドになるので、これらは人体等からもかなり発生する。臭いがきついものが多い。

ケトン類

油性ラッカーや印刷インキなどの溶剤等に使用されている可能性がある。アセトンはマニキュア除光液などの化粧品に含まれている可能性がある。

1.4 日本の住宅における室内気中濃度の推移

室内化学物質の気中濃度に関しては、様々な研究機関が実態調査を行っている。ここでは、厚生労働省及び国土交通省によって行われた実態調査に関してその結果を引用して説明する。

1.4.1 厚生労働省の実態調査

厚生労働省によって全国の一般家屋に対して居住環境中のVOCの実態調査^{3)~7)}が行われた。1997年度に180戸、1998年度に205戸が対象となった。調査結果の概要は以下の通りである。詳細な報告は、インターネットでも公開されている。

- 1) 化学物質の室内濃度は、1998年度調査ではパラジクロロベンゼンで平均値 $123\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、トルエンで平均値 $98\mu\text{g}/\text{m}^3$ を示す等、全国的に室外濃度に比べ高いレベルであった。
- 2) 調査家屋の大部分は低濃度レベルであったが、パラジクロロベンゼンでは最大値 $6059\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、トルエンでは最大値 $3390\mu\text{g}/\text{m}^3$ を示す等、一部の家屋において高濃度の検出が認められた。
- 3) トルエン等についてはWHO空気質ガイドライン値を超える事例が認められた。(1998年度: トルエンでは全体数の6%) また、パラジクロロベンゼンについては、厚生労働省が示す耐容平均気中濃度を超える事例が認められた (1998年度: 全体数の5%)。
- 4) 個人曝露濃度については、全般的に、室内濃度と高い相関関係を示したことから、室内曝露が個人曝露量に大きく寄与していることが明らかになった。
- 5) 新築住宅と中古住宅を比較すると、トルエンの室内濃度平均値が、1998年度では中古住宅の $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対して、新築住宅では $304\mu\text{g}/\text{m}^3$ を示すなど、一部の物質で高い傾向を示した。その他、建材の材質別、暖房器具の種類別等で一部の室内濃度や個人曝露濃度に差が認められた。

1.4.2 国土交通省の実態調査

2000年6月に、学識経験者、関係省庁、関係団体の参加により発足した「室内空気対策研究会」では、2000年度、住宅室内の空気環境に関する全国レベルの実態調査を実施した⁸⁾。室内空気対策研究会ホームページでも調査結果が公開されている。2000年度実態調査の結果について、2000年9月から、全国で約10,500戸の住宅において、空気環境の実態調査を行った。蒸気拡散式分析法による簡易測定機器（測定バッジ）を用い、室内空気中の約24時間平均濃度の測定を行った。調査の主な集計結果は次のとおりである。ここで、23℃においてホルムアルデヒド濃度は0.08ppmが、100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ になる。以下はその結果である。

- 1) ホルムアルデヒドの平均濃度は0.073ppmであり、厚生労働省の濃度指針値0.08 ppmを下回り、同指針を超える住宅は約28.7%あった。
- 2) トルエンの平均濃度は0.041 ppmであり、厚生労働省の濃度指針値0.07 ppmを下回り、同指針を超える住宅は約13.6%あった。
- 3) キシレンの平均濃度は0.006 ppmであり、厚生労働省の濃度指針値0.20 ppmを下回り、同指針を超える住宅は約0.2%あった。
- 4) エチルベンゼンの平均濃度は0.010 ppmであり、全ての住宅において厚生労働省の濃度指針値0.88 ppmを下回り、同指針を超える住宅はなかった。

以上から、今回調査を行った4物質の中で優先的に対策に取り組むべきであるのは、濃度の高い住宅が多かったホルムアルデヒドであり、次いでトルエンであるとしている。

2000年から2005年にかけて行った室内空気汚染の実態調査の中、築1年以下の建物における化学物質の気中濃度測定結果を表1-7に示す。なお、厚生労働省で定めている濃度指針値は、ホルムアルデヒド0.08ppm (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、トルエン0.05ppm (260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、キシレン0.20ppm (870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、エチルベンゼン0.88ppm (3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、スチレン0.05ppm (220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、アセトアルデヒド0.03ppm (48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)である。

新築住宅におけるホルムアルデヒドとトルエンの気中濃度は、調査を始めた2000年の僅か1年後の2001年にはすでに指針値超過率が前年度の半分以下となっている。これは、シックハウス問題に積極的に取り組んできた努力の結果と言える。

表 1-7 各年の気中平均濃度と指針値超過率 (国土交通省、2006)

		2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
ホルムアルデヒド	平均濃度 [ppm]	0.073	0.05	0.043	0.04	0.028	0.025
	指針値超過率 [%]	28.7	13.3	7.1	5.6	1.6	1.5
トルエン	平均濃度 [ppm]	0.041	0.023	0.017	0.017	0.004	0.003
	指針値超過率 [%]	13.6	6.4	4.8	2.2	0.6	0.3
キシレン	平均濃度 [ppm]	0.006	0.009	0.005	0.004	0.002	0.001
	指針値超過率 [%]	0.2	0.3	0.0	0.1	0.2	0.0
エチルベンゼン	平均濃度 [ppm]	0.01	0.005	0.003	0.004	0.001	0.001
	指針値超過率 [%]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
スチレン	平均濃度 [ppm]	-	0.002	0.0005	0.0002	0.0003	0.001
	指針値超過率 [%]	-	1.1	0.0	0.1	0.1	0.6
アセトアルデヒド	平均濃度 [ppm]	-	-	0.017	0.015	0.018	0.017
	指針値超過率 [%]	-	-	0.0	0.0	0.1	0.1

2000年の調査対象住宅の中、ホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、エチルベンゼンの気中濃度が厚生省の指針値を超えた住宅を対象に追跡調査を行った。

当初は指針値を超えていた住宅においてもホルムアルデヒド濃度は2000年の結果に比べ、2001年夏に64.7%、2002年夏には52.6%水準まで下がっていた。トルエンの場合は2001年夏には2000年測定結果値の16.1%水準まで、2004年夏には4.3%まで下がり、時間経過と共に減衰していることが分かる。

キシレンとエチルベンゼンも2002年冬にはそれぞれ2000年対比14%と4%まで下がり低い濃度になった。

ホルムアルデヒドは使用される目的から見ると内部拡散支配型の放散特性を持つことが多く、時間による減衰が他の物質に比べて遅い。従って、ホルムアルデヒド対策は換気のみでは不十分であり、放散源対策、つまり建材対策が必要である。

1.5 建材から発生する化学物質の放散速度測定法とフラックス発生量測定法

1.5.1 アクティブ測定法とパッシブ測定法

室内空気質の主な評価対象としては汚染化学物質の気中濃度、建材からの放散量、換気量が挙げられる。

測定法を大別すると、吸引ポンプと吸着管を始め清浄空気発生装置、流量調節装置等の機械装置を用いるアクティブ法と電動系の機器を使わずパッシブ拡散サンプラーを用いるパッシブ法²⁷⁾がある。これまでの評価手法としては汚染物質の気中濃度測定にはアクティブ測定法と呼ばれる、ポンプを用いたサンプリングを行う方法が主に用いられてきた。

アクティブ測定法を用いる際には、気中濃度測定に吸引ポンプ・チューブなど、建材から発生する化学物質の発生量測定には清浄空気発生器・流量制御装置・放散セル・チューブ・吸引ポンプなどの器具、機器が必要である。

建材からの汚染化学物質放散量測定法として、実験室レベルではチャンバー法 (JIS A 1901、1911、1912、ISO 16000-9)、デシケータ法 (JIS A 1460)²⁸⁾等が良く使われている。チャンバー法は換気のある実際の室内環境を考慮して考案された方法であり、精密な実験ができることと再現性がよいことから多く用いられている。

実態調査等現場にも対応できる方法としては ISO16000-10 (Determination of the emission of volatile organic compounds. Emission test cell method) でも紹介されている FLEC (Field and Laboratory Emission Cell)²⁹⁾がよく知られている。FLEC は現場測定と実験室試験両方に対応できる長所を持っている。

小型チャンバー、大型チャンバー、FLEC などは換気をチャンバーやセル内に清浄空気などを流し、チャンバーやセル内に設置された建材から放散される物質を連続的に排気し、換気のある条件で定常状態に達した際の建材からの放散性能を測定する方法である。そのため、換気のある実際の住宅条件を模擬することができ、より実状に近い条件下における建材の放散性能が精密に測定できる長所を持つ。しかし、チャンバーやセルのみではなく清浄空気発生器、流量制御装置、吸引ポンプ、チューブなどが必要となり初期費用、維持管理費、運転費などの費用、専門知識を持った人力、測定期間中の手間、少なくとも 7 日以上長い試験時間を要する。また、居住状態では機器騒音等の問題もある。

そのため、簡便な試験法として、ホルムアルデヒド測定には以前からデシケータ法が制定されていたが、VOCs に関しては簡便な試験法がなかった。そこで、2008 年 2 月に JIS A 1903「パッシブフラックス発生量測定法」¹⁵⁾が制定された。この測定法は小型セルを建材表面に被せ、パッシブサンプラーを用いる事で測定ができる簡便な方法である。更に、現場測定に用いる場合は居住

者が在室状態でも日常生活に支障をもたらさず建材からの化学物質発生量が測定できる。

パッシブ測定法はステティックヘッドスペース法 (Static Head Space Method) であり、換気を行わずに密閉されたチャンバーもしくはセル内に建材を設置し、容器内での物質放散を安定させた後、パッシブサンプラーを用いて空気分子の自然拡散によるサンプリングを行う。換気を行わないため建材から放散された物質は外部に排出されず安定した容器内環境下で一定速度でパッシブサンプラーに捕集される。そのためパッシブ測定法を用いた建材からの放散量測定結果フラックス発生量と称ずる。

チャンバーなどダイナミックヘッドスペース法を用いた建材からの放散量測定結果は放散速度 (Emission Rate) と呼び単位は $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ を用いる。単位時間当たり、単位面積当たりに放散される物質の量として表す。

パッシブ法による測定値も従来の放散速度と同じ $[\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}]$ を用いるが、ステティックヘッドスペース法として根本的に試験法が異なるためチャンバー試験の結果と区別するために、このパッシブ試験法をパッシブフラックス法 (Passive Flux Method) と呼び、その結果値をフラックス発生量 (Passive Flux) と呼ぶ。

「1.5 建材から発生する化学物質の放散速度測定法とフラックス発生量測定法」では、アクティブ測定法とパッシブ測定法の原理及び既存の試験法について紹介し、本研究における「フラックス発生量測定法」の論拠について説明する。

1.5.2 アクティブ法を用いた放散速度測定法

(1) 小型チャンバー法 (Small Chamber Method : JIS A 1901)

JIS A 1901 では 20~1000L までの容積を持ったチャンバーを小型チャンバー⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾と分類している。小型チャンバーは日本、デンマーク、ドイツ、アメリカなどで独自的に開発されたものが存在する。回収率が高い、試験の再現性が高い、装置制御の精度が高い、自動制御が可能である、実績が豊富であり蓄積データが多いことなどから、日本と韓国で最も多く使われているのは早稲田大学田辺研究室で開発された 20L 小型チャンバーシステムである。

20L 小型チャンバーシステムはステンレス製 (SUS-34)チャンバー、清浄空気製造装置、エア制御ユニット、混合器に分けられる。20L チャンバー本体および混合器は恒温槽内へ設置し、温度制御を行う。チャンバー容量は 20L、45L、80L、100L、150L、280L、500L などがあるが、運搬、解体・洗浄・設置、加熱処理等が容易であることから、20L チャンバーが最も多く普及している。図 1-1 にエア制御ユニットと 20L チャンバーを、建材からの放散試験風景を図 1-2 に示す。



図 1-1 20L 小型チャンバーシステムと 20L チャンバー



図 1-2 建材試験風景

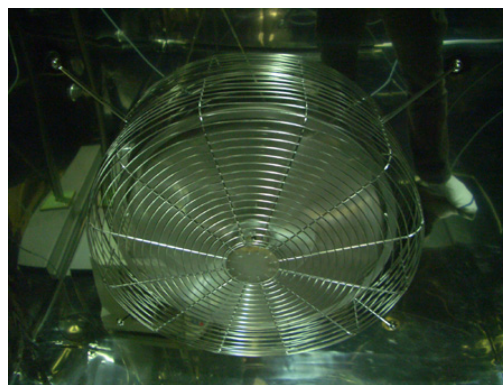
(2) 大形チャンバー法 (Large Chamber Method : JIS A 1911, 1912)

図 1-3 に 23.8m^3 大形チャンバー外観及びチャンバー内攪拌ファンを示す。
容積 $1\text{m}^3 \sim 80\text{m}^3$ のチャンバーを大型チャンバー^{30) 31)}と呼ぶ。日本では 5m^3 、 15m^3 、 24m^3 のものが多い。換気方式や試料負荷率など建材試験に関する内容は基本的には小型チャンバー法と同じであるが、大型装置であるためチャンバー内化学物質のバックグラウンド濃度基準が小型チャンバーより多少高くなっている。

用途は建材、家具、システムキッチン、家電製品など大きなものからの放散量測定である。部材を個別に測定する必要がなく製品ごとに入れて試験ができる。製品ごとに試験を行う場合は $[\mu\text{g}/\text{unit} \cdot \text{h}]$ として放散性能を表す。



大型チャンバー外観



チャンバー内の攪拌ファン

図 1-3 大形チャンバー外観及びチャンバー内攪拌ファン



図 1-4 チャンバー内試験用建材設置風景

(3) FLEC

FLEC²⁹⁾は ECA（欧州共同研究）の 20 以上のプロジェクトチャンバーにも含まれ、デンマークの規格でも使用されている。

FLEC は建材から発生する化学物質の測定や評価を行う小型セルで、材料表面上に設置し、材料から放散する化学物質を測定する。

図 1-5 に FLEC-SYSTEM のセル及び空気制御装置を示す。FLEC セルは、材料表面からの化学物質放散量を測るセル部分で、FLEC AIR CONTROLLER は、湿度制御されたクリーンエアをセルに供給するためのコントローラである。FLEC およびチューブ、連結部分すべては高品質ステンレス製で、内表面は中央に向かって滑らかな曲線を描いている。試料の最大表面積 0.0177m^2 、最大容積 0.035L 、直径 0.15m の円形である。最大試料負荷（セル容積に対する試験材料面積の比）は $506\text{m}^2/\text{m}^3$ 、換気回数 686回/h （流量 0.4L/min の場合）である。FLEC と試験材料表面の間の接触面は、化学物質の放散がないシリコンゴム枠で密閉される。



図 1-5 FLEC セル及び FLEC Air Controller

清浄空気（または窒素）は、空気ボンベから Air Controller に入って湿度調整されてからテフロンチューブを通り、対角に位置する 2 つの入口から入り、セル周囲に均等に配置されている約 1mm の円形の空気スリットを通して、試験材料上に分散され、セル中央部の上から出て行く。このような配列によって、試験材料表面上の気流は一定に保たれる。

長所としては実験室実験と現場実測両方に対応できるため多目的に使用できる、セル素材の熱容量が大きく実測時の温度変動に影響されにくい、空気の流速が一定である、再現性がある、放散速度の計算がしやすいことが挙げられる。

欠点としては、容積が小さいため大きい流量で実験が行えない、シール性に注意が必要であることが挙げられる。

(4) 小型椀型チャンバー

チャンバー有効気積 0.021m^3 で、放散量を測定する建材の表面に設置して用いる³²⁾。建材表面から放散量が測定でき、小口や裏面の考慮が不要となる。恒温恒湿実験室内に設置され、活性炭フィルター・混気箱を経由して調湿された空気が、吹出しチャンバーから微正圧に調整されたチャンバー内に供給される。また、チャンバー表面に設置した面状発熱体によりチャンバー内を加熱することができる。

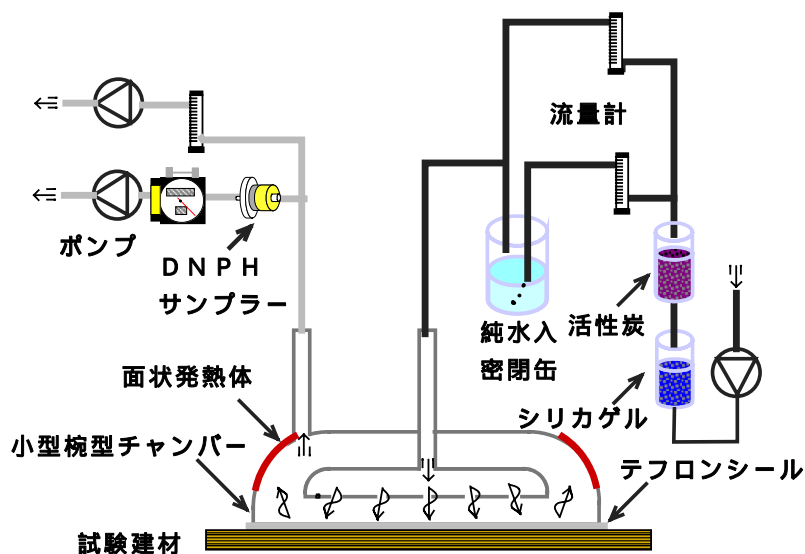


図 1-6 小型椀型チャンバー（小峰ら、2002）

(5) フラスコ法

日本塗料検査協会が、チャンバー法的一种であるミニチャンバー法（フラスコ法）³³⁾を用いて室内用塗料の測定を行っている。

VOCs 捕集装置、試験片設置用チャンバーの概要図を図 1-7 に示す。

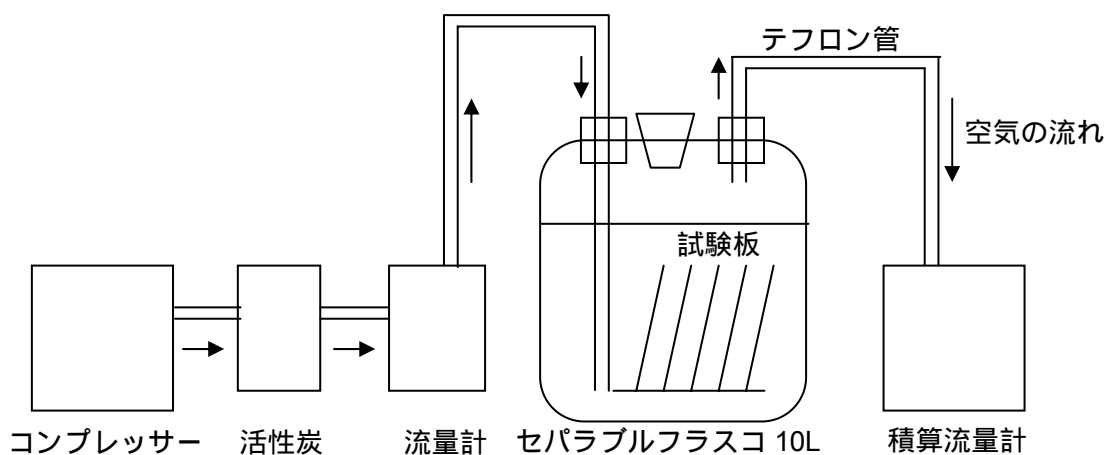


図 1-7 フラスコ法試験概要図（日本塗料工業会）

10L のセパラブルフラスコをチャンバーとして用いる方法で、フラスコ内に塗料を塗布した試験片を設置し、給排気を行いながら放散量の測定を行う方法である。

試験板は、JIS K 5410 で規定するアルミニウム板（ $150 \times 150 \times 70 \times 1.0\text{mm}$ ）を用いる。

試験片の作製は、JIS K 5400 の 3.3（試験片の作製）による。塗装する前に試験板のアルミニウム板をアセトン/トルエン=1/1 により脱脂を行う。塗装は、はけ塗りとし、1 枚（ $15\text{cm} \times 7\text{cm}$ ）当たり試料約 2.5g（精秤）を 1 回塗りして塗装を行う。全試験片の枚数は、5 枚とする。全塗布面積は、 525cm^2 である。

1.5.3 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法

パッシブ法を用いた建材からの化学物質放散量試験法としては、ホルムアルデヒド類を対象とした JIS A1460「建築用ボード類のホルムアルデヒド量の試験方法-デシケータ法」が 2001 年 3 月に制定され、2007 年 2 月には VOCs を対象とした JIS A1903「建築材料からの揮発性有機化合物 (VOC) のフラックス発生量測定法-パッシブ法」¹⁵⁾が制定された。

アクティブサンプリングは精度の高い測定結果を得られる反面、専用の設置器具やポンプを用いるため、多数のサンプリングをするには困難である。それに対して、パッシブサンプリングは煩雑な手順や知識を必要とせず、多数同時にサンプリングを行ったり、長期に渡る測定を行う場合も容易に行うことができる。

本研究で開発した、

また、既往研究では多数の測定方法が研究されており、ここでは本研究で開発したフラックス発生量測定器具である小型セル及び他のフラックス発生量測定法についてまとめた。

パッシブフラックス法は建材から気中へ分子拡散の原理で放散され、測定容器内で対流が起きないことを前提としている。

建材から放散する化学物質の拡散フラックスは式 (1-1) に示す Fick の第一法則によって表すことができる³⁴⁾³⁵⁾³⁶⁾。

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \dots (1-1)$$

J : 物質のフラックス [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

D : 物質の拡散係数 [m^2/sec]

C : 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

x : 距離 [m]

表面から気中における室内濃度分布は図 1-8 に示すような境界層モデルによって表される。

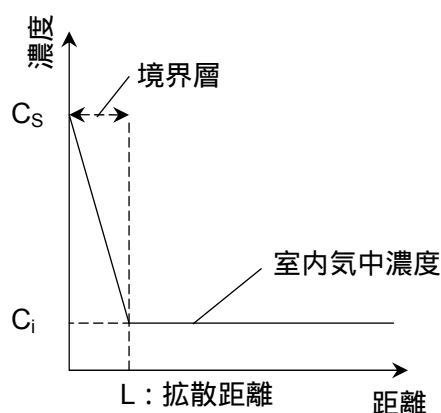


図 1-8 境界層モデル

物質が媒体を介して移動する現象は式（1-2）の一般化拡散方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial[J]}{\partial t} = D \frac{\partial^2[J]}{\partial x^2} - v \frac{\partial[J]}{\partial x} - k[J] \quad \dots (1-2)$$

k_R : 反応に関連した速度係数

一般化拡散方程式は対流、拡散、反応の 3 つの項からなっているが、一般環境下では化学物質の反応速度は遅いため対流と拡散項のみを考慮する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_c \frac{\partial C}{\partial x} \quad \dots (1-3)$$

v_c : 対流速度 [m/s]

更に、パッシブフラックス法では密閉された小さな容器の中での化学物質分子の移動を想定しているため、対流項も削除することができ式（1-1）のようになる。

建材からのフラックスは建材表面濃度 C_s と、拡散距離 L における室内濃度 C_i との差異に依る。拡散係数 D は拡散物質及び媒体毎に定められた値である。これと同様な現象が小型測定容器内で起こっていることを、吸着剤内濃度 $C_F=0$ と仮定して吸着限界まで吸着可能であることで説明できる。よって、建材からのフラックスは式（1-4）のように表すことができる。

$$J = D \frac{\Delta C}{L} = D \frac{C_s - C_i}{L} \quad \cdots (1-4)$$

L : 拡散境界層厚さ [m]

C_s : 物質の建材表面濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

C_i : 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

建材から吸着剤までの濃度勾配は吸着剤が対象物質の吸着限界に到達するまで定常状態と仮定する。吸着剤表面の物質濃度を0と仮定すると、式(1-4)は以下の式(1-5)のように変形できる。

$$J = D \frac{C_s - C_F}{L} \cong D \frac{C_s}{L} \quad \cdots (1-5)$$

C_F : 物質の吸着剤表面濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

各物質における拡散係数と建材表面濃度を測定することは難しい。しかし、物質の捕集量、捕集時間、放散面積が分かれば、単位時間・単位面積当たりの発生量が計算でき、式(1-6)として表すことができる。

$$J_A = \frac{M}{A_{ad} \times t} \quad \cdots (1-6)$$

J_A : 単位面積・単位時間当たりのフラックス発生量 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

M : 物質の捕集量 [μg]

A_{ad} : 器具設置部分の建材表面積 [m^2]

t : 測定時間 [h]

1.5.4 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法の種類

(1) デシケータ法 (JIS A 1460)

日本農林規格 (JAS)、日本工業規格 (JIS) によるホルムアルデヒド放散量の規格は、デシケータ法²⁸⁾を用いて測定されている。JIS 適合ボード類については、ホルムアルデヒド放散量の等級表示が義務づけられている。

測定方法は、図 1-9 に示す JIS R3503 (化学分析用ガラス器具) に規定する内径 240mm (内容積 9~11L) のデシケータの底部に 300mL の蒸留水を入れた直径 12cm、高さ 6cm の結晶皿を置き、その上に試験体を置いて 24 時間放置し、放散されたホルムアルデヒドを蒸留水に吸収させる。ホルムアルデヒド濃度はアセチルアセトン法によって光電分光光度計あるいは波長 415nm 付近の測定が可能な光電比色計を用いて比色定量する。表 1-8 に測定条件を示す。

表 1-8 デシケータ法の測定条件

	規格	試験体	測定温度
フローリング	フローリングの農林規格 農林水産省告示第 1073 号	50 × 150mm ² のものを 10 片、支持金具で固定	20 ± 1°C
繊維板	JIS A 5905	50 × 150mm ² のもので木口を含んだ全表面積が 1800cm ² となる枚数を支持金具で固定	20 ± 1°C
パーティクルボード	JIS A 5908		20 ± 1°C

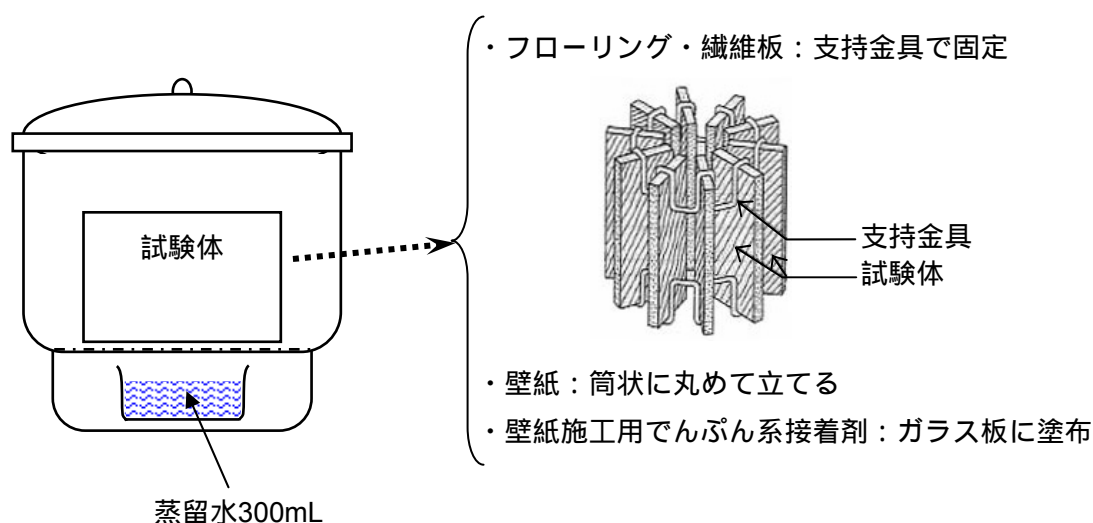


図 1-9 デシケータ法概要

(2) 逆デシケータ法

合板やパーティクルボードなどの製品管理はチャンバー法やデシケータ法で行われているが、消費者の段階で問題になるのは気中濃度である。デシケータ値から気中濃度を推定する式が提案されているが、この推定式を適用できる条件としては、材料のホルムアルデヒド放散特性が表裏面及び側面で同じであること、デシケータ値を測定した試料を居室にそのまま（両面剥き出しで）使用することが必要となる。しかし実際には、フローリングや特殊合板のように表裏面のホルムアルデヒド放散特性が異なる建材が多く、住宅に使われる場合は建材の片面だけ居室に曝される。

そのため、デシケータ法の欠点を補完したホルムアルデヒド測定方法として「逆デシケータ法」³⁷⁾が提案されている。この方法は材料の上にデシケータを逆さまに置くもので（図 1-10）、その方法の原形は Brunner によって報告されている。JAS、JIS のデシケータ法で使われているデシケータをこの逆デシケータ法に使用すると、現在のデシケータ法での試料表面積の 4 分の 1 程度になる。それに対応して、結晶皿表面積及び蒸留水量を調節する必要がある。藤井らの理論式によれば、試料面積が 4 分の 1 になった場合、水の表面積（結晶皿の面積）と水量も 4 分の 1 にすればデシケータ値は変化しないことになる。

逆デシケータ法は、結晶皿の代わりに内径約 6cm のビーカー（PYREX の 200mL のビーカー）を使い、蒸留水の量は 75mL とする。また、ビーカーは適当な支えを用いてうかせ、材料表面がビーカーによって覆われないようにする（例えば、プラスチックコップに穴をいくつか開けて、それを逆さまにして材料の上に置き、その上にビーカーを載せる）。材料の大きさは 40cm×40cm の場合（側面を含めない場合）と 40cm×20cm を 2 枚突き合わせした場合（側面を含む場合）の 2 通りある。表 1-9 にデシケータ法と逆デシケータ法の比較を示す。

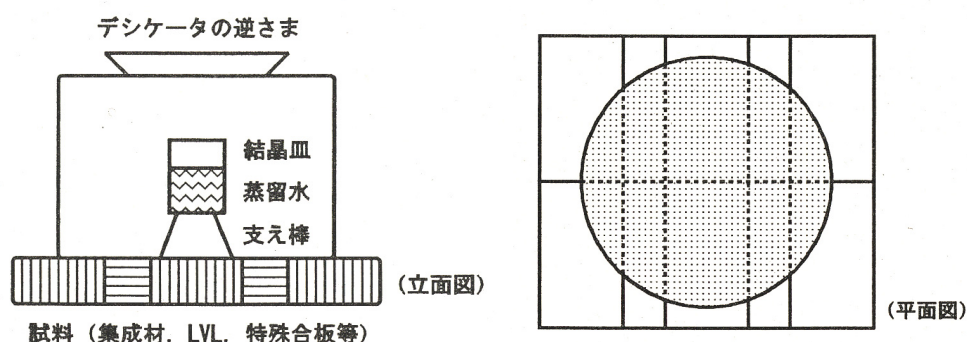


図 1-10 逆デシケータ法概要

表 1-9 デシケータ法と逆デシケータ法の比較

試験条件	デシケータ法	逆デシケータ法
試験片の面積	約 1800cm ²	約 450cm ² (約 1/4)
結晶皿の直径	12cm	6cm (200mL のビーカー)
結晶皿の面積	約 104 cm ²	約 28cm ² (約 1/4)
捕集水の量	300mL	75mL (1/4)

(3) TEA-Dish 法

既設住宅における部位別の測定法として、岩田らは放散予測部位を簡易に測定するアルミ箔膜トリエタノールアミン (TEA) 濾紙法を考案した³⁸⁾。ホルムアルデヒドの放散源を検討するため、堀によって開発された TEA 濾紙を用いて床 (フローリング)、壁紙、天井、押入れ (物入れ)、ドア、台所収納など住宅内部の各面を測定する。

選定した放散予測部位の中央部に 12cm×12cm のアルミ箔を敷き、その上に 10%TEA 含浸セルローズ濾紙 (直径 9cm) をのせる。TEA-Dish 概要図を図 1-11 に、測定風景を図 1-12 に示す。アルミ箔膜シート (約 45cm×50cm) で覆い周辺部を医療用テープまたはビニールテープでとめ密封し、貼ったアルミ箔の大きさを計測している。約 20 時間放置後、TEA 濾紙を回収する。

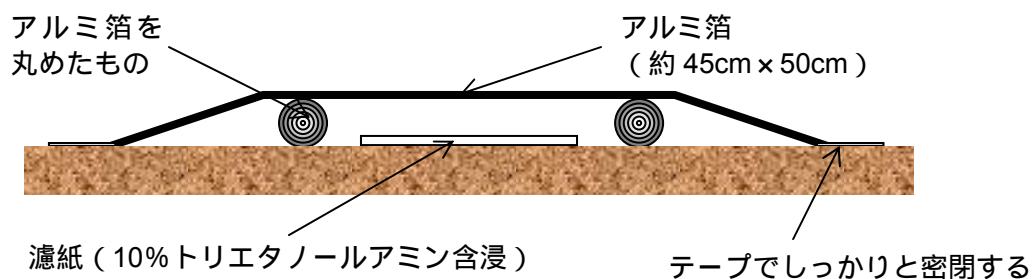


図 1-11 アルミ箔膜 TEA 濾紙法概要図 (岩田ら、2000)

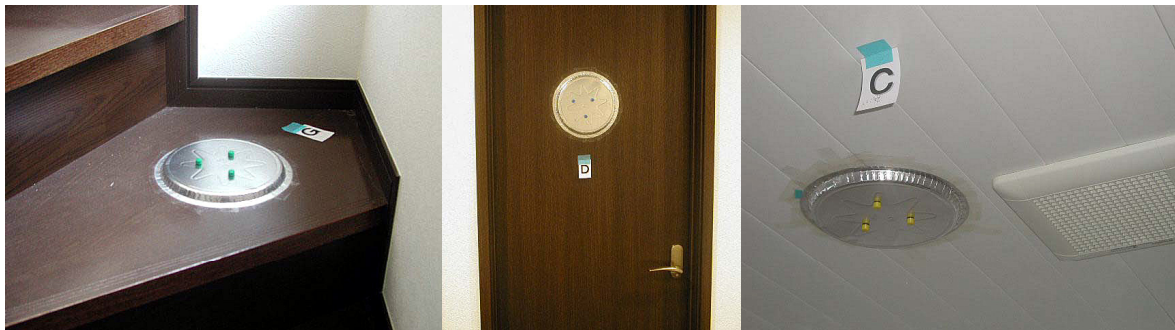


図 1-12 TEA-Dish 測定風景 (岩田ら)

(4) パッシブフラックスサンプラー (PFS)

パッシブフラックスサンプラー (Passive Flux Sampler、以下 PFS)³⁹⁾では、ガラス製シャーレ (内径 41.5mm、内深 15.5mm) を設置し容器内外の空気を遮断し、内部に測定対象成分に対応した吸着剤や吸着シートを固定し、建材から放散する対象物質を捕集する。建築現場においても床や壁、天井などに設置し、フラックス発生量が簡便に測定できる。また、3 つ以上の拡散長にてフラックスを測定し、その 2 つの関係をプロットすることにより測定した検体の放散律速段階を特定することができる。

対象物質をカルボニル化合物、VOCs (揮発性有機化合物)、フタル酸エステル、有機リンに分類し、吸着剤及び吸着シートは異なるものを使用する。カルボニル化合物には DNPH シート、VOCs には Carbotrap B、フタル酸エステル及び有機リンには活性炭シートを用いる。捕集時に捕集媒体が落下、捕集媒体と検体との距離 (拡散長) が変わることを避けるため、捕集媒体はガラス濾紙更にそれらをテフロンチューブにて固定する。PFS の外観を図 1-13 に、断面図を 1-14 に示す。

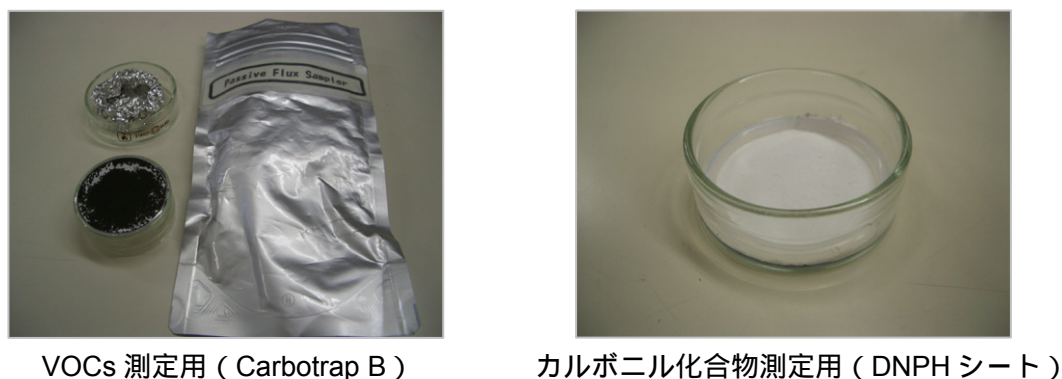


図 1-13 PFS 外観

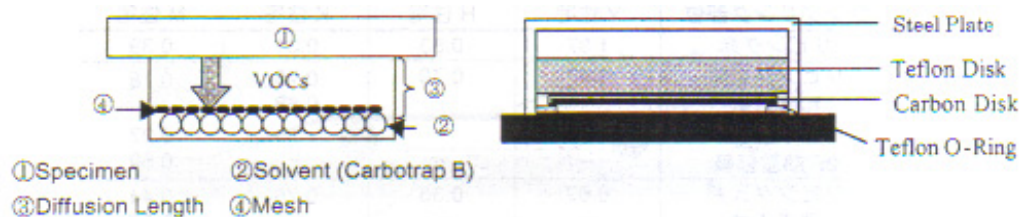


図 1-14 PFS 断面図 (柳澤ら、2002)

サンプラー内部の拡散が律速となっている場合には、建材の表面濃度はその条件下での最大値となり、建材からの放散速度 (フラックス) は拡散長の逆数に比例する。つまり、拡散長を変えてフラックスの測定を行うことにより、表面の最大濃度 (平衡濃度) が得られ、短期的な室内濃度シミュレーションが可能となる。また、建材内における反応、拡散、吸脱着が律速となっている場合、フラックスは一定 (最大フラックス) となる。

つまり、拡散長を変えてフラックスを測定することにより、建材の特性に関する情報が得られる。両方の律速段階が混在する建材においては拡散長とフラックスの関係は両方の遷移域にある。ここで用いている拡散長 15mm は多くの建材に一般的に適応できる距離である。

(5) DSAC

DSAC⁴⁰⁾はステンレス製 (SUS34)の円筒容器 (内径 125mm×内高 55mm、気積：約 675mL) を設置し容器内外の空気を遮断し、サンプラー差し込み口にパッシブサンプラーを差し込み、フラックス発生量を簡単に測定することができる。

カルボニル化合物に対しては DSD-DNPH パッシブサンプラー、VOCs に対してはパッシブサンプラー-VOC-SD を使用する。DSAC の概観を図 1-15 に、概要図を図 1-16 に示す。



図 1-15 DSAC 外観 (村江ら、2004)

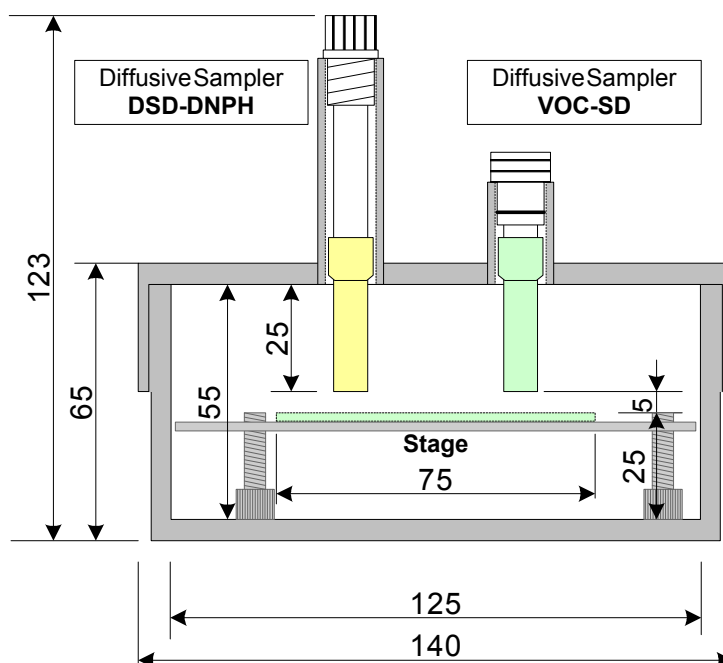


図 1-16 DSAC 概要図 (村江ら、2004)

(6) バイオチェック法

空気中のホルムアルデヒドの測定を目的とした簡易測定法である。この測定法⁴¹⁾は、試薬を内蔵したアンプルを割り、試薬を本体の指示部に染み込ませた後、測定対象箇所に設置し2時間置くと、ホルムアルデヒドの濃度に応じて指示部の色に変色する。15～30℃、10～90%RHでの測定が可能である。

指示部上のスリットに比色チャートを差し、横に滑らせて指示部の変色がA～Eのどの段階に相当するか調べる。変色が色見本の間にある場合は下の段階として評価する。測定誤差は30%以内である。

1.5.5 本研究におけるフラックス発生量測定法

本研究で開発した測定器具である小型セル⁴²⁾は、ステンレス製(SUS34)の台形状容器(縦59 mm×横97.5 mm×高さ56 mm、試験面積0.005758 m²、容積300 mL (±5 %))である。測定対象面に設置し容器内外の空気を遮断し、サンプラー差込み口にパッシブサンプラーを差込んで、建材から放散される対象物質を捕集する。

フラックス発生量測定用小型セルは現場実測用と実験室や現場における建材実験用として開発したものがある。小型セルの現場測定風景を図1-17に、建材試験用小型セルの写真を図1-18に示す。また、小型セルに用いるパッシブサンプラー及び小型セルの写真を図1-19に、小型セルの詳細図を図1-20に示す。

対象物質をホルムアルデヒドなどのカルボニル化合物とVOCs(揮発性有機化合物)に分類し、小型セル及びパッシブサンプラーを異なるものを使用する。カルボニル化合物に対してはCarbonyl用小型セル及びDSD-DNPHパッシブサンプラー^{43) 44)}を、VOCsに対してはVOC用小型セル及びパッシブサンプラーVOC-SD⁴⁵⁾を使用する。DSD-DNPHパッシブサンプラーと、パッシブサンプラーVOC-SDはサンプラーの長さが異なるため、サンプラーを小型セルに差し込んだ時に捕集位置を同じとするため、小型セルのサンプラー差し込み口の形状が異なる。

建材試験用として開発した小型セルは、小型チャンバーの放散試験に用いられる試験片のサイズと同じ165×165mmの試験片を用いてフラックス発生量測定試験ができる。

更に、1台当たりに2つの小型セルが設置できるため、ダブルサンプリングは勿論1枚の試料からのカルボニル化合物及びVOCsの同時測定が可能である。



図 1-17 現場実測用小型セル



図 1-18 建材試験用小型セル

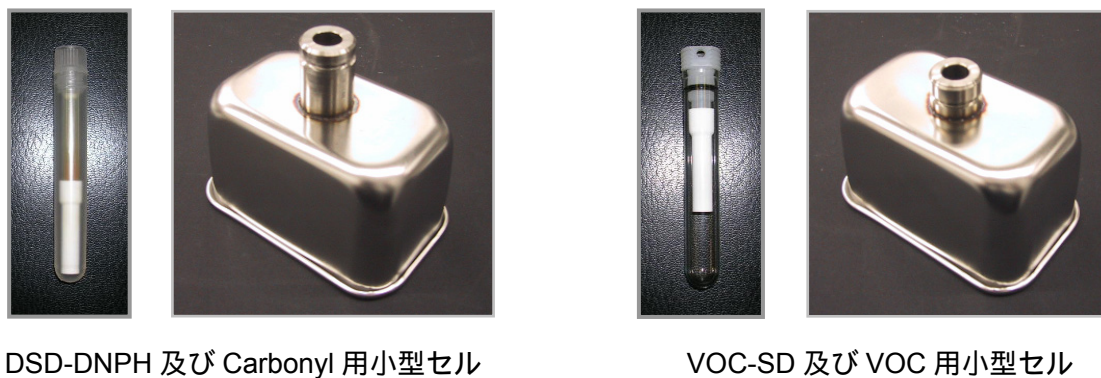


図 1-19 パッシブサンプラー及び小型セル

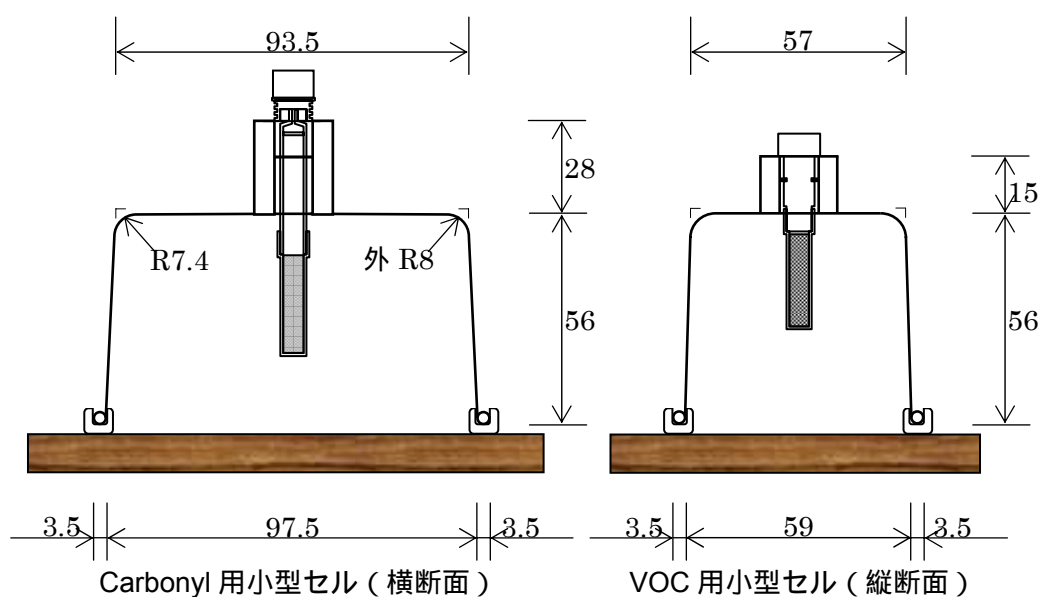


図 1-20 小型セルの詳細図

現場において床や壁、天井などに設置しフラックス放散量を測定する際には、各面に固定するためのサポーターを用いる。

軽量であり、天井・壁・床からの放散量をカルボニル化合物及び VOCs に対して同時に測定ができる長所を持つ。捕集時間としては 24 時間を主に用いているが現場の条件や目的により 8 時間～数日まで調整できる柔軟性も有している。

1.6 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法

1.6.1 PFT 法概要

換気量は室内外温度差と風速・風向、開口部の開閉、換気システムを運転するなどの生活活動によって影響を受ける。一般住宅では短期間の換気量より数時間～数日間の長期間の測定により、平均換気量を求めることが居住者への影響を把握するにあたり効果的であることがある。

また、2003 年 7 月に改正建築基準法が施行され、必要換気量の確保のため機械換気設備の設置が義務化され、機械換気設備が設置される住宅が増えているが、実際の換気実態に関する実測例は多くない。

換気量測定^{14) 16) 46)}のためによく用いられるガスモニターを用いたトレーサーガス法はトレーサーガスボンベ、ガス流量制御装置、サンプリング及び分析装置、制御用 PC、チューブなどが必要で、大掛かりな装備になる。また、装置は高価で、重量であるため人力を必要とする。更に、操作に専門知識が必要であり、維持管理にも手間と費用がかかる。そのため、実際の現場や住宅の測定例を増やし、実状を把握するには負担が大きい。

更に、アクティブ法のトレーサーガスとしてよく用いられる SF₆や CO₂において、SF₆は地球温暖化係数が高く（約 22000）使用が制限される流れにあること、CO₂はバックグラウンドが高く居住者の呼気に含まれているため居住状態での測定が困難であることが短所である。

現場や実住宅における換気の実態を把握するためにはより多い測定例が必要であり、そのためには簡便で騒音などが無く、精度を確保できる測定法が望まれる。

そこで、本論文では PFT 法(Perfluorocarbon Tracergas Technique)^{17)~21)}を用いた換気量測定法に関する研究^{47)~51)}を行った。PFT 法は大型の機器や装置等が不要で人間の活動に支障を来さずに数時間から数週間の期間中平均換気量測定が可能である。

PFT 法はトレーサーガスとして、PFCs（Perfluorocarbons：過フッ化炭素類）を用いる一定発生法的一种である。PFCs は自然界に存在しない物質であるため、人工的に放散させた量を容易に測定でき、トレーサーガスとして有用である。本研究における PFT 法は「簡易一定発生法－濃度平均法」であり、トレーサーガスとして PFCs（Perfluorocarbons）を用いたパッシブ法による換気量測定法である。

「1.6 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法」では PFT 法を用いた換気量測定法の概要及び原理について述べ、また海外における PFT 法について紹介した。

また、PFT 放散源からの放散量の制御及び温度依存性を明白にした PFT 放散源の開発と PFCs3 物質に対するパッシブサンプラーのサンプリングレート（Sampling Rate：相当吸引速度）算出実験を行った結果については第 3 章にて述べる。

1.6.2 測定原理

測定原理は、測定対象ゾーン毎に異なる PFT 放散源を設置し、常温・常圧で液体の PFCs を、隔膜を通して放散させる。対象空間に吸着剤を充填したパッシブサンプラーを設置し、移流と拡散により移動する PFT を捕集する。捕集した PFT を脱離後、ガスクロマトグラフ（Gas Chromatograph）システムを用いて分析を行う。

換気量は、既知のトレーサーガスの時間あたり放散量と、検出された捕集量から算出された気中濃度によって算出される（式 1-8）。

$$\bar{C} = \frac{M_a - M_{TB}}{K \times t} \times 10^6 \quad \dots (1-7)$$

\bar{C} : 測定期間中の時間平均気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

M_a : 測定用サンプラーの捕集総重量 [μg]

M_{TB} : トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]

K : 相当吸引速度（Sampling Rate）[ml/min]

t : 捕集時間 [min]

$$\bar{Q} = \frac{\bar{m}}{\bar{C}} \quad \dots (1-8)$$

\bar{Q} : 時間平均換気量 [m^3/h]

\bar{m} : 時間平均トレーサーガス発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]

\bar{C} : 測定期間中の時間平均気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

1.6.3 トレーサーガス

PFCs (Perfluorocarbon : 過フッ化炭素類) は、自然界には存在しない物質であるため、バックグラウンド濃度が低く人工的に放散させた量のみを測定すれば換気量測定ができる。

PFT 法は以下に記す特徴を持っている¹⁹⁾²⁰⁾。

- ・ 自然界に存在しない物質であるため外気及び室内空気のバックグラウンド濃度は無視できる。
- ・ PFCs は化学的・物理的に安定である。
- ・ 揮発性を持ち、固体吸着剤で捕集できる。
- ・ 低濃度でもガスクロマトグラフや分析器等で定量できる。
- ・ PFCs の種類を増やす事で多数室における外気導入量及び室間空気交換量が算定できる。
- ・ 経済的に合理的な価格で入手できる。

上に示した 6 条件を満たすものとして、PFT には、perfluoroalkylcycloalkane 族の完全にフッ素化された有機化合物が用いられる。Dietz らや Fisk¹⁷⁾によって既往研究で用いられている PFT を表 1-10 に示す。また、各 PFT の構造式を図 1-21 に示す。

本研究で PFT として用いた物質は C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} の 3 物質である。

表 1-10 PFT の種類

物質	Perfluoro- benzene	Perfluoro- cyclohexane	Perfluoro- dimethyl- cyclobutane	Perfluoro- methyl- benzene	Perfluoro- methyl- cyclohexane	Perfluoro- 1,3-dimethyl cyclohexane
略名	PFB	PCH	PDCB	PMB	PMCH	PDCH
化学式	C_6F_6	C_6F_{12}	C_6F_{12}	C_7F_8	C_7F_{14}	C_8F_{16}
分子量	186.06	300.05	300.05	236.06	350.05	400.06
CAS No.	392-56-3	355-68-0	2994-71-0	434-64-0	355-02-2	335-27-3
融点 [°C]	3.7 ~ 4.1	-	-41.2	-65.6	-37.0	-
沸点 [°C]	81 ~ 82	-	-	103~105	76.3±0.4	101~102
密度 [g/cm ³]	1.612	-	-	1.666	1.788	-
蒸気圧 [atm]	-	0.44	0.50	-	0.14	0.046

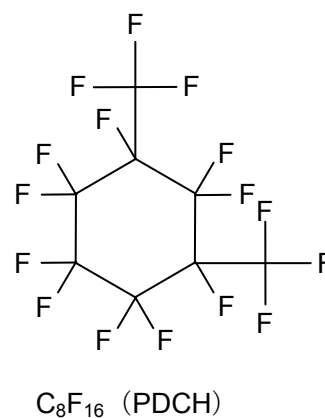
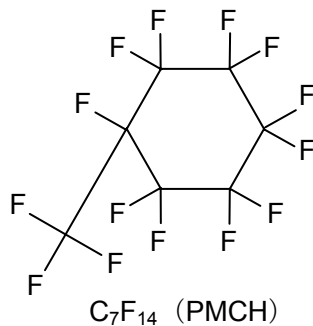
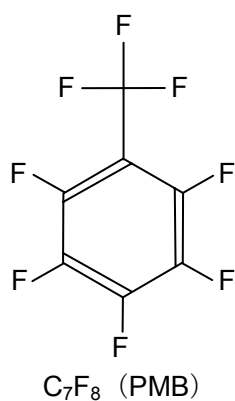
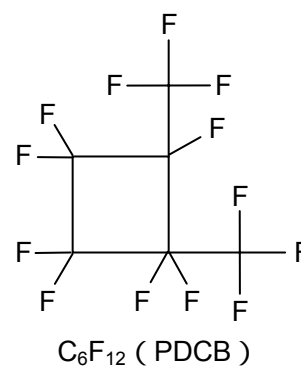
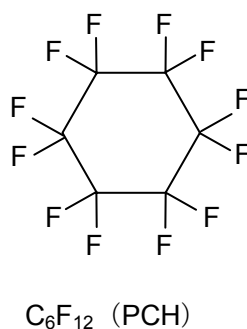
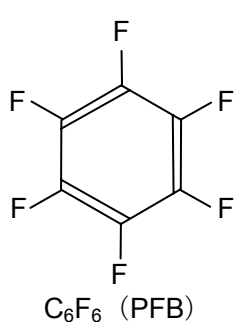


図 1-21 各 PFT 構造式

1.6.4 PFT 放散源

Brookhaven 国立研究所の Dietz らが測定キット「Brookhaven National Laboratory Air Infiltration Measurement System (BNL/AIMS)」を開発した^{21) 52)}。キットは、小型の PFT 放散源とパッシブサンプラーからなり、再利用可能であり、誰もが使用することができる。また、数日から数ヶ月以上にわたる測定を行うことが可能なので、長期間における平均換気量を測定することができる。さらに、プログラム化されたマルチチューブサンプラーまたは即時分析器を使うことによって、時系列変化も測定できる。

BNL/AIMS の PFT 放散源の概要を図 1-22 に示す。全長 32mm、内径 6.6mm のアルミニウムシェルの中に 0.4mL 充填されている液体の PFT がシリコンゴム栓を通して、PFT 蒸気を一定の速度で放散する。

カプセルは薄膜で覆われ、その膜はトレーサーガスの分子を浸透させる。トレーサーの放散速度は薄膜上の蒸気圧や薄膜の浸透性の違いによって、決定される。

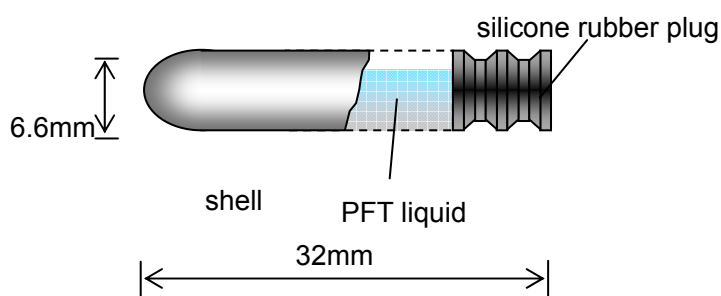


図 1-22 BNL/AIMS の PFT 源概要

また、スウェーデンの Stymne ら¹⁸⁾が実験に用いた PFT 放散源（図 1-23）は 2mL のクリンパバイアル瓶に厚さ 1mm のテフロン薄膜を利用したものである。放散量は断続的にバイアル瓶の重さを量ることで決定される。

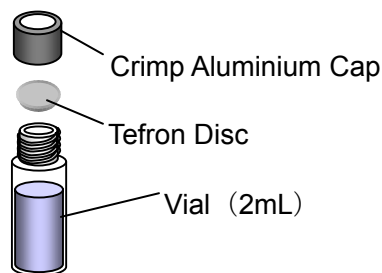


図 1-23 Stymne らのトレーサーガス源

アメリカの Fisk ら¹⁷⁾は、Stymne らの PFT 放散源にはテフロン膜とキャップに問題があると考え、perfluorotoluene (C_7F_8)、perfluorodimethylcyclohexane (C_8F_{16})、perfluoromethylcyclohexane (C_7F_{14})、perfluorobenzene (C_6F_6) の4種類の PFCs を容積約 7mL のバイアル瓶に充填し、隔膜をシリコン素材、キャップをスクリュー状とした (図 1-24)。

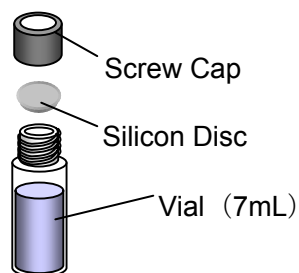


図 1-24 Fisk らの PFT 放散源

1.6.5 パッシブサンプラー

パッシブサンプラー²⁷⁾としては、少量で大きな表面積が得られる多孔質の吸着剤が充填されているものが使用される。代表的な吸着剤として、活性炭や多孔質ポリマーがある。

サンプラーの PFT サンプリングレートは吸着剤を収納している樹脂膜の分子移動力によって決定され、理論上は室内空気と吸着剤表面との PFT の濃度勾配とチューブ開口部の面積に比例する。しかし、空気中からサンプラー内への拡散は複雑であり、理論値と実際の測定値に差が生じるため、PFT のサンプリングレートを実験によって求める必要がある。

BNL/AIMS のパッシブサンプラーは、CATS と呼ばれる毛細管吸着チューブサンプラーである。ガラスチューブは外径 6.4mm、内径 4mm、全長 6.4cm の大きさで、先端が細くなっている。サンプリング中を除いては、特別に製造されたポリウレタンゴムキャップで口を覆う。それぞれのトレーサーの理論的な有効空気吸引速度は、ペルフルオロジメチルシクロブタン (C_6F_{12}) とペルフルオロメチルシクロペンタン (C_6F_{12}) が 214mL/day、ペルフルオロメチルシクロヘキサン (C_7F_{14}) が 201mL/day、ペルフルオロ-1,3-ジメチルシクロヘキサン (C_8F_{16}) が 188mL/day である。

Stymne らが用いたパッシブサンプラーの概要を図 1-25 に示す。これは市販されている標準の活性炭サンプリングチューブで、内径 4.3mm ガラスチューブの吸着層に約 100mg、予備の吸着層に約 50mg の活性炭が充填されている。吸着層の上面から 17mm のところでガラスチューブが切り取られており、拡散長は 17 ± 1 mm となっている。サンプリング中以外には、プラスチックキャップで開口部を覆う。

PentIAQ 社で用いられているパッシブサンプラー⁵³⁾外形は先端が尖っている Stymne らのサンプラーと似ているが、全長約 56 mm、外径約 3mm のガラスチューブであり、サイズが多少異なる。チューブ内には厚さ 25mm にわたって活性炭が充填されており、その上にはガラスウールが厚さ 5mm 程充填されている。

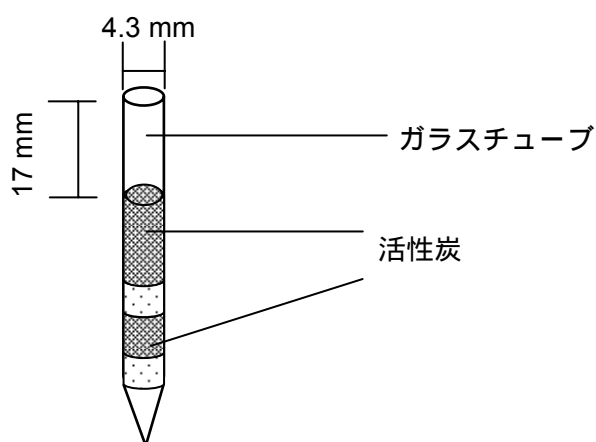


図 1-25 Stymne らのパッシブサンプラー

1.6.6 基礎理論

パッシブサンプラーは吸着剤の容器として多孔板や多孔質のフィルムなどを利用し、サンプラーの内部での物質の移動が分子拡散のみで制御される構造になっている。捕集剤は活性炭などの吸着剤や吸収液などである。

空間内で、温度、圧力、濃度などが一定であり、時間の経過と共に見た目上その性質に変化がない場合を平衡状態と呼ぶ。気体分子のレベルで観察すると、分子はあらゆる方向にそれぞれ違った速度で運動し、衝突し、位置も速度も変化する。個々の分子についてみると変化していても、系全体について平均すると変化していないのが平衡状態である。単位体積当たりの分子の数、すなわち濃度が一定であることも平衡状態である。2 種またはそれ以上の異なる気体の各々の濃度が場所によって異なるとき、その静止空間内の濃度が均一になるまで気体分子は混ざる。この分子の移動を拡散といい、質量移動の結果である^{34) 35) 36) 54)}。

平衡状態の系に特定の分子を選択的に吸着する捕集剤を投入して、その分子を系から取り除くと、捕集剤近辺ではその気体の濃度が小さくなり非平衡状態になる。非平衡状態の系は分子の拡散により平衡状態に移行するように働きかける。すなわち、濃度が均一になるように分子の拡散が生じる。この現象がパッシブサンプラー^{27) 43) 45) 55)}の基本原則である。

Fick は、“分子の移動量は濃度勾配に比例する”という経験的な拡散の法則を示した。これを、Fick の第 1 法則という。微量成分が x 方向に拡散する場合のフラックスは Fick の第一則により次式で表される。

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta X} \quad \dots (1-9)$$

C : 気中濃度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

D : 拡散係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$

J : 物質のフラックス $[\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}]$

x : 拡散方向の距離 $[\text{m}]$

ここで、次の記号を定義する。

A_0 : サンプラーの入口面積 $[\text{m}^2]$

C_A : 環境濃度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

L_0 : サンプラーの入口から捕集剤表面までの距離（拡散距離） $[\text{m}]$

Ma : サンプラーの捕集量 $[\mu\text{g}]$

t : 捕集時間（サンプリング時間） $[\text{h}]$

まず、サンプラーの入口を通過して、サンプラー内へ時間 t の間に移動した物質の量は $J \times A \times t$ であり、これが捕集量 M_a となる。

$$M_a = J \times A_0 \times t \quad \dots (1-10)$$

さらに式 (1-9) の C は、捕集剤表面の空气中濃度と環境濃度 C_A の差である。捕集剤が十分な吸着能力を有していると仮定すると捕集剤表面の濃度は 0 となり、

$$\Delta C = C_A \quad \dots (1-11)$$

また、式 (1-9) の x はサンプラーの入口から捕集剤表面までの距離なので、

$$\Delta x = L_0 \quad \dots (1-12)$$

式 (1-10) ～ (1-12) を式 (1-9) に代入し、マイナス符号は物質移動の方向を表すため取り除いて変形すればパッシブサンプラーの基本式、式 (1-13) を導き出すことができる。

$$C_A = \frac{M_s}{D \times \frac{A_0}{L_0} \times t} \quad \dots (1-13)$$

式 (1-13) 中の $D \times (A_0/L_0)$ をサンプリングレート K と通常呼んでいる。 K の単位 [ml/min] はアクティブ法における吸引ポンプの空気吸引速度と同じになる。したがって、式 (1-13) の分母 $K \times t$ はアクティブサンプラーの場合の吸引空気量に相当する。

K は物質とサンプラー固有の定数である。通常 K は実験によって決定および確認する必要がある。また、シャルルの法則により、式 (1-14) が成立する。

$$UR = 10^9 \times MW \times \frac{273.15}{273.15 + \theta} \times \frac{1}{22.414} \times 10^{-3} \times K \times 60 \times 10^{-9} \quad \dots (1-14)$$

UR : アップテイクレート (Uptake Rate) [ng/(ppb・h)]

MW : モル質量 [g/mol]

K : サンプリングレート (Sampling Rate : 相当吸引速度) [mL/min]

θ : 温度 [°C]

アップテイクレートの意味は、単位時間・単位濃度の捕集における、物質の絶対捕集重量の比率ということになる。本研究で使用するパッシブサンプラーは居住環境下で一般的に検出される VOCs 各物質のアップテイクレートが実験によって算出されているが、PFCs に関しては公表された値がない。よって、式 (1-14) よりサンプリングレートは式 (1-15) を整理し、式 (1-16) のように温度の関数として求めることができる。

$$K = a \times 10^{-9} \times \frac{1}{M} \times \frac{273.15 + \theta}{273.15} \times 22.414 \times 10^3 \times \frac{1}{60} \times 10^9 \quad \cdots (1-15)$$

$$K = \frac{a}{M} \times \frac{273.15 + \theta}{273.15} \times 22.414 \times \frac{1}{60} \times 10^3 \quad \cdots (1-16)$$

1.6.7 分析

パッシブサンプラーに捕集された PFT は加熱脱着もしくは溶媒抽出の前処理後、ガスクロマトグラフシステム（GC-ECD、GC-MS）を用いて分析する⁵⁶⁾。

Brookhaven に改良された装置では、捕集されたトレーサーガス物質の加熱脱着、化学的・物理的处理、クロマトグラフによる分離、ECD による検量が行われる。

また、Fisk らはガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）を用いて分析を行った。

本研究では、固体吸着、溶媒抽出と GC-MS 分析を用いた。

1.6.8 換気量算定式

Maldonado は一連の試験により、天井高 2.44m の居間や寝室、地下室といった通常の部屋では、トレーサーガス濃度は約 $\pm 1\sim 3\%$ 以内の誤差でほぼ均一であることを実証した。従って、家の階全体がかなり良く混合されているとみなすことができるということが必要だが、同じ階の部屋間の差異は大体 $\pm 10\%$ 以内である。このことは、Dietz と Cote によっても実証されている。

PFT 法はマルチガス (Multigas) を用いることができるため、複数に区画された住宅や建物において、それぞれのゾーンからの空気流出量とゾーン間の空気交換量の算定に適用できる。

建物を、室容積が既知で、よく混合された 1 ゾーンであるとみなすと、放散速度が既知の 1 種類のトレーサーを用いて、式 (1-17) の物質収支式が成り立つ¹³⁾¹⁴⁾。

$$V \frac{dC(t)}{dt} = M(t) - Q(t) C(t) \quad \dots (1-17)$$

V : 空間の容積 (定数) [m^3]

$M(t)$: 時間 t におけるトレーサーガス放散量 [ml/h]

$C(t)$: 時間 t における建物内の平均トレーサー濃度 [ml/m^3]

$Q(t)$: 空気流出量 [m^3/h]

PFT 放散源からのトレーサーガスは一定放散する。0.5 回/h \sim 1.0 回/h 換気時に放散源配置後約 5 時間 \sim 10 時間で、室内のトレーサー濃度はほぼ一定になる。これらの定常状態の仮定 (すなわち、 $dC(t)/dt = 0$) 及び、一定時間を超えた後は放散量が一定であるとの仮定 (即ち、 $M(t)=M$) から、平均流出量 \bar{Q} 、平均濃度 \bar{C} として、式 (1-17) から式 (1-18) が得られる。

$$\bar{Q} = \frac{\bar{M}}{\bar{C}} \quad \dots (1-18)$$

3 ゾーンの例として、平面的に 3 つの室を有している住宅や 3 階建の住宅、地下室をもつ 2 階建の住宅等が挙げられる。それぞれのゾーンに異なるトレーサーを用い、定常状態の前提の下では、9 つの未知流量 (各ゾーンの 3 つの空気流出量と 6 つの互いの空気交換量) を解くために 9 つの連立方程式が立てられる。また、3 組の空気流量収支式から 3 つの未知の流入量を算出できる。

(ゾーン 1)

$$A : Q_{2,1}C_{A2} + Q_{3,1}C_{A3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{A1} = -M_A \quad \dots (1-19)$$

$$B : Q_{2,1}C_{B2} + Q_{3,1}C_{B3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{B1} = 0 \quad \dots (1-20)$$

$$C : Q_{2,1}C_{C2} + Q_{3,1}C_{C3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{C1} = 0 \quad \dots (1-21)$$

(ゾーン2)

$$A : Q_{3,2}C_{A3} + Q_{1,2}C_{A1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{A2} = 0 \quad \dots (1-22)$$

$$B : Q_{3,2}C_{B3} + Q_{1,2}C_{B1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{B2} = -M_B \quad \dots (1-23)$$

$$C : Q_{3,2}C_{C3} + Q_{1,2}C_{C1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{C2} = 0 \quad \dots (1-24)$$

(ゾーン3)

$$A : Q_{1,3}C_{A1} + Q_{2,3}C_{A2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{A3} = 0 \quad \dots (1-25)$$

$$B : Q_{1,3}C_{B1} + Q_{2,3}C_{B2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{B3} = 0 \quad \dots (1-26)$$

$$C : Q_{1,3}C_{C1} + Q_{2,3}C_{C2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{C3} = -M_C \quad \dots (1-27)$$

$Q_{n,m}$: ゾーン n から m への空気交換量 [m^3/h]

$Q_{n,0}$: ゾーン n と外気の空気交換量 [m^3/h]

M_A, M_B, M_C : 物質 A, B, C それぞれの放散量 [$\mu g/h$]

C_{An}, C_{Bn}, C_{Cn} : 各ゾーンにおける各物質の気中濃度 [$\mu g/m^3$]

$$Q_{0,1} = Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} - Q_{2,1} - Q_{3,1} \quad \dots (1-28)$$

$$Q_{0,2} = Q_{2,0} + Q_{2,1} + Q_{2,3} - Q_{1,2} - Q_{3,2} \quad \dots (1-29)$$

$$Q_{0,3} = Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} - Q_{1,3} - Q_{2,3} \quad \dots (1-30)$$

$Q_{0,1}, Q_{0,2}, Q_{0,3}$: 外気から各ゾーンへの空気交換量 [m^3/h]

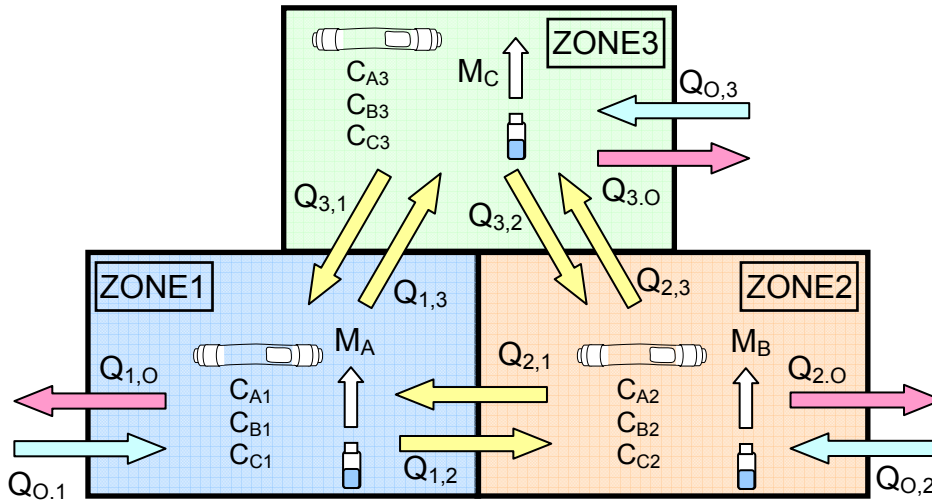


図 1-26 3 ゾーンモデル

N ゾーンの場合

N ゾーンの場合には、 N^2 個の未知数（各ゾーンの N 個の空気流出量と $N(N-1)$ 個の互いの空気交換量）を求めるために N^2 組のトレーサガス物質収支式が立てられる。また、N 組の空気流量収支式から N 個の未知の流入量を算出できる。

1.7 本論文の構成

本論文は全7章からなる。以下に各章の概要をまとめる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、室内化学物質汚染に関連したシックハウス症候群と有害化学物質の物性、健康影響などを調べ、国の対策としての指針値、法律の制定及び厚生労働省・国土交通省による室内空気汚染の実態調査内容について述べた。また、アクティブ測定法とパッシブ測定法の原理及び既存の試験法について調査・紹介し、本研究におけるフラックス発生量測定法とPFT法（Perfluorocarbon Tracergas Technique）を用いた換気量測定法について説明した。

第2章「パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法」では、フラックス発生量測定器具として開発した小型セルの性能試験を行った結果をまとめた。

フラックス発生量測定法としてステンレス（SUS34）製の台形状小型セルを開発し、断熱材として使用されるEPS（Expanded Polystyrene foam：発泡ポリスチレン）3種類からの放散量測定を小型セル法及び20L小型チャンバー法を用いて行った。接着剤からの化学物質放散量測定においては、既存のガラス板に接着剤を塗布した試験片（JIS A 1902）は初期放散が高く短時間で放散量が少なくなるため、けい酸カルシウム板を試験片基材として用いる方法を提案し、接着剤の放散量試験を行った。更に、接着剤に含まれるトルエンとキシレンの添加量を変えた4種類の試験片を作製し、小型セルによるフラックス発生量と20L小型チャンバーによる放散速度試験を行い、添加量による相関を調べた。試験片の養生条件を変えたフラックス発生量試験を行い養生条件がフラックス発生量測定結果に与える影響を調べた。

第3章「PFT換気量測定法」では、本研究におけるPFT換気量測定法の基礎研究として、PFT放散源の開発及び放散量の温度依存性実験、PFCs（Perfluorocarbons）3物質に対するパッシブサンプラーのサンプリングレート算出実験を行った。更に、これまで換気量算出式として用いていた連立方程式を確定的方法で解く方法から、換気に関する現実的な仮定を拘束条件とした最小二乗法を取り入れる手法について述べた。

第4章「パッシブ法を用いたPFT換気量測定法とSF₆法、CO₂法、差圧測定法の周期変動条件下における比較実験」では、PFT換気量測定法の実験集合住宅におけるPFT法の外乱による影響特性を把握するために、SF₆（Sulfur hexafluoride：六フッ化硫黄）連続供給法、CO₂（Carbon dioxide：二酸化炭素）一定濃度法、差圧法との比較実験を行った。南北面外壁における差圧を一定に調節できる設備を設けた多数室を有する実大実験集合住宅において外乱変動を模擬し、4条件の圧力条件を設定して、パッシブ法であるPFT法、アクティブ法であるSF₆連続供給法及びCO₂一定濃度法を用いた。同時に差圧測定を行い換気回路網を用いて外気導入量の計算を行った結果を実測値と比較し、PFT法の外乱による影響に関して検討を行った。

第5章「多数室を有する戸建住宅における換気量測定」では、多様な換気方式及び間取りを持つ実住宅において、PFT 換気量測定を SF₆ 一定濃度法及び濃度減衰法、CO₂ 一定濃度法、風量測定法などの測定法と同時に測定を行い、比較検討した。

PFT 法が現場測定で他の換気量測定法と比較してどの程度の精度が確保でき、また測定における限界と適用性を明確にすること、換気設備を実際の住宅に適用した際、どの程度の換気性能を確保できるかを検証した。

第1種換気システムを有する2階建戸建住宅における実測では、第1種換気システムの換気性能検証及び各 PFCs 物質の組み合わせが換気量測定結果に及ぼす影響について検討した。

第1種換気システムが設けられた同一分譲地区内の新築戸建住宅2戸における多数室換気実測では、他のトレーサーガス法と比較測定を行うと共に、実住宅において必要換気量確保のために設けられた換気設備が設計通りに動作しているか、また実際の住宅に設置した際の実際の換気量について実測を行った。

第3種ハイブリッド換気設備が設けられた工業地域の集合住宅実測は1次実測から1年後に2次実測を行った。ハイブリッド換気、自然換気、常時第3種換気の3条件を設けて実測を行い、時間の経過による換気システムの性能変化について調査した。

2種類の第3種セントラル換気システムが設置されている3階建戸建住宅では縦方向にゾーン分けをして縦方向に対する PFT 換気量測定法の精度検証測定を行った。また、測定対象住宅に設けられている2種類の第3種セントラル換気システムの換気性能を比較すると共に室内換気性状の把握を行った。

第6章「パッシブ法を用いた韓国の新築集合住宅における空気質実態調査」は、本論文で提案したパッシブ法を用いた室内空気質測定法を実住宅に適用し、韓国の新築集合住宅7戸を対象に、気中濃度、床・壁・天井からのフラックス発生量、PFT 法を用いた換気量測定を同時に行った結果についてまとめた。

第7章は、「総括」として本論文における各章の内容をまとめた。

本論文の構成及びフロー図を次頁の図 1-27 に示す。

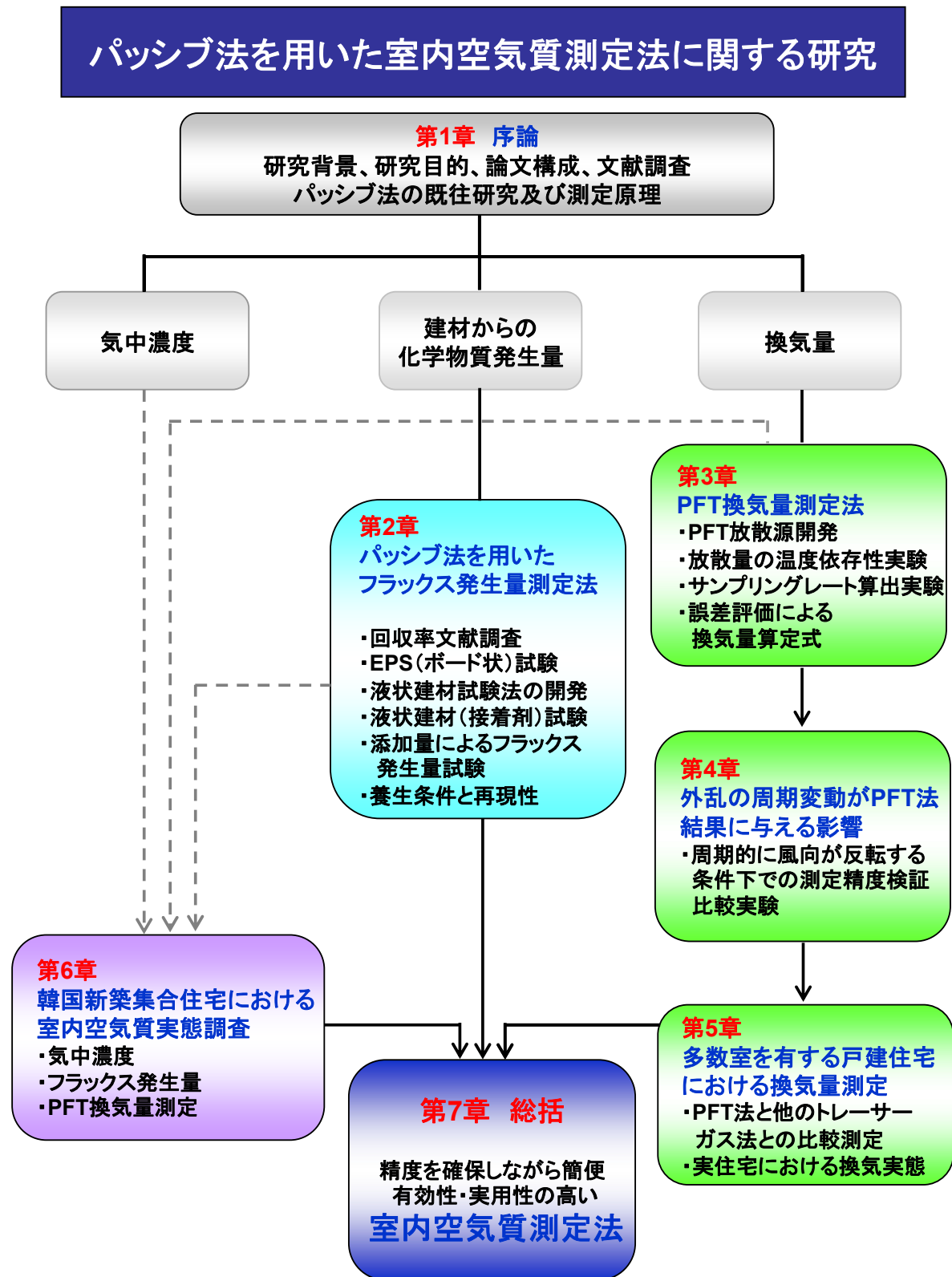


図 1-27 本論文の構成及びフロー

【参考文献】

- 1) 田辺新一：室内化学汚染、講談社現代新書、1998
- 2) 国土交通省：改正建築基準法に基づくシックハウス対策コーナー、
<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/sickhouse.html>
- 3) 厚生労働省：シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書—第1回～第3回のまとめについて、報道発表資料、http://www1.mhlw.go.jp/houdou/1206/h0629-2_13.html、2000年6月29日
- 4) 厚生労働省：シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書—第4回～第5回のまとめについて、報道発表資料、http://www1.mhlw.go.jp/houdou/1212/h1222-1_13.html、2000年12月22日
- 5) 厚生労働省：シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書—第6回～第7回のまとめについて、報道発表資料、<http://www1.mhlw.go.jp/houdou/0107/h0724-1.html>、2001年7月24日
- 6) 厚生労働省：シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書—第8回～第9回のまとめについて、報道発表資料、<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2002/02/h0208-3.html>
- 7) 厚生労働省：シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会—第10回開催について、
<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2004/03/s0323-3.html>、2004年3月9日
- 8) 国土交通省住宅建築指導課、シックハウス対策マニュアル編集委員会他：建築物のシックハウス対策マニュアル、2003
- 9) 日本規格協会、建築材料の揮発性有機化合物（VOC）、ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散測定方法—小形チャンバー法、JIS A 1901、2003
- 10) 村上周三、田辺新一：JIS 使い方シリーズ シックハウス対策に役立つ小形チャンバー法解説 [JIS A 1901]、日本規格協会、2003
- 11) ISO, ISO 16000-9 : Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing - Emission test chamber method, 2006
- 12) 空気調和・衛生工学会：室内換気効率の現場測定法・同解説、空気調和・衛生工学会規格、2002
- 13) 空気調和・衛生工学会：トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工学会規格、2004
- 14) Peter W. Grieve : Measuring ventilation using tracer-gas, Brüel & Kjær, 1989
- 15) JIS A 1903、建築材料の揮発性有機化合物（VOC）のフラックス発生量測定法—パッシブ法、日本規格協会、2008
- 16) 空気調和・衛生工学会：トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工学会規格、2004
- 17) W.J. Fisk, D. Faulkner, and A.T. Hodgson : The pollutant control index : a new method of characterizing ventilation in commercial buildings, Proceedings of Indoor Air '93, Vol.5, pp.9-14., 1993

- 18) Hans Stymne and Anita Eliasson : Development of a new PFT-method for ventilation rate measurements, NBS-I, The Development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.37-48, 1991
- 19) Jorma O. Säteri : The measurement of ventilation using integrating tracer techniques, NBS-I, The development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.11-32, 1991
- 20) J. Sateri, A. Majanen : The evaluation of field measurements of ventilation parameters made using the passive perfluorocarbon method, Clima 2000, Vol.1, pp.282-289, 2000
- 21) Russell N. Dietz and Edgar A. Cote : Air infiltration measurement in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, Environment International, Vol. 8, pp. 419-433, 1982
- 22) WHO : Health-based Guideline, Air quality guideline, 1999
- 23) WHO : Indoor air quality: organic pollutants, EURO Reports and Studies 111, 1987
- 24) 東賢一他 : 建築に使われる化学物質辞典、風土社、2006
- 25) 野間佐和子 : 有機化合物辞典、講談社、1985
- 26) 東賢一、池田耕一、久留飛克明、中川雅至、長谷川あゆみ、森有紀子、山田裕巳 : 建築に使われる化学物質事典、風土社、2006
- 27) ISO: ISO 10617-2 Indoor, ambient and workplace air. Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography. Diffusive sampling, 2003
- 28) 日本規格協会 : 建築用ボード類のホルムアルデヒド放散量の試験方法ーデシケーター法、JIS A 1460、JIS 特集版 シックハウス、2001
- 29) P. Wolkoff, PA.Clausen, P.Anielsen, H.Gustafsson, B.Jonsson, E.Rasmusen : Field and Laboratory Emission Cell: FLEC・IAQ 91 Healthy Buildings, pp.160-165, 1991
- 30) 日本規格協会 : 建築材料などからのホルムアルデヒド放散測定方法ー大形チャンバー法、JIS A 1911、2006
- 31) 日本規格協会 : 建築材料などからの揮発性有機化合物 (VOC), 及びホルムアルデヒドを除く他のカルボニル化合物放散測定方法ー大形チャンバー法、JIS A 1912、2008
- 32) 神寛樹, 木村洋, 小峯祐己 : ホルムアルデヒド気中濃度予測手法に関する研究、日本建築学会学術講演会梗概集 D-2、pp. 877-880、2002
- 33) 日本塗料工業会 : 室内環境対策部会報告書、1999
- 34) Atkins、de Paula : 物理化学 (Physical Chemistry 7th Edition) 韓国語版、OXFORD、2004
- 35) Atkins、de Paula : 物理化学 (Physical Chemistry 4th Edition) 日本語版、OXFORD、1993
- 36) 小林清志、飯田嘉宏 : 新版移動論、朝倉書店、1989
- 37) 財団法人日本住宅・木材技術センター : ホルムアルデヒドと木質建材利用の手引き、1999
- 38) 塚原弘泰、堀雅宏、岩田利枝 : トリエタノールアミン濾紙を用いた簡易測定法による住宅内のホルムアルデヒド汚染に関する実測研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.749-750、2000
- 39) 熊谷一清、藤井実、篠原直秀、義之信司、柳澤幸雄 : パッシブ型放散量測定装置の開発 その1 加熱脱着法を用いた VOCs フラックスの測定、日本建築学会大会梗概集 pp.1009-1010、2002

-
- 40) 村江行忠：内装建材からの化学物質放散量の測定方法と簡易測定法の提案、建築仕上技術 vol.29、pp52-55、2004
 - 41) 日本トレーゲル株式会社：バイオチェック F 取扱説明書
 - 42) 田辺ら：建材から発生するアルデヒド類のパッシブ測定法 (ADSEC) の開発 その 1～その 5、日本建築学会、2000、2001
 - 43) 内山茂久、金子敏郎、田辺新一、長谷川修司：分子拡散型サンプラーDSD-DNPH による大気中カルボニル化合物の測定、千葉市環境保健研究所年報 (第 6 号)、1999
 - 44) SUPELCO：DSD-DNPH 取扱説明書
 - 45) スペルコ事業部：室内大気パッシブサンプラー、VOCs 捕集用 (溶媒抽出タイプ) 高性能パッシブサンプラーVOC-SD,取扱説明書、シグマアルドリッチジャパン株式会社
 - 46) 空気調和・衛生工学会：室内換気効率の現場測定法・同解説、空気調和・衛生工学会規格、2002
 - 47) Seiichi Tabuchi, Marina Asai, Satoshi Sakai, Noriko Marumoto and Shin-ichi Tanabe : Application of a simple method for detection and quantifying VOC sources, Proceedings of Roomvent 2004, Indoor Air Quality, CD-ROM, 2004
 - 48) 田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、吉田和之、柏原誠一、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 19 PFT 法を用いた換気量簡易測定法検討実測、日本建築学会大会学術講演 概要集、D-2、pp.913-914、2005
 - 49) 服部将志、田中祐輔、窪田圭佑、金勲、田辺新一、柏原誠一、吉田和之：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 23 戸建住宅における PFT 法、CO₂ 一定濃度法、SF₆ 一定濃度法、風量測定法を用いた換気量測定の比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.921-922、2006
 - 50) 柏原誠一、松田克己、吉田和之、今井秀秋、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 24 戸建住宅実測における PFT 法の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.923-924、2006
 - 51) 金勲、李晟在、成旻起、田辺新一：パッシブ測定法を用いた韓国新築集合住宅の室内空気質調査、日本建築学会環境系論文集、第 608 号、pp.31-38、2006
 - 52) Russell N. Dietz, Robert W. Goodrich, Edgar A. Cote, Robert F. Wieser : Detailed Description and Performance of a Passive Perfluorocarbon Tracer System for Building Ventilation and Air Exchange Measurements, ASTM STP 904, pp. 203-264, 1986
 - 53) PentIAQ : Description and accuracy of the PFT-homogeneous emission technique. The method of Pentiaq, 1998
 - 54) Sawyer, McCarty, Parkin : 環境化学 (Chemistry for Environmental Engineering and Science 5th Edition) 韓国語版、Mc Graw Hill、2005
 - 55) 柴田化学株式会社：パッシブガスチューブ使用マニュアル
 - 56) 森田昌敏他：有害大気汚染物質測定の実際、社団法人日本環境衛生センター、1997
-

第2章

パッシブ法を用いた フラックス発生量測定法

第2章 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法

2.1 背景と目的

シックハウス症候群対策の基本となるのは有害化学物質の放散が少ない建材を使用する「発生源対策」と、適切な換気を確保する「換気対策」である¹⁾²⁾。発生源対策のためには、有害化学物質の放散量が少ない低放散建材を用いることが最も効果的であるが、室内に発生源が存在する場合は建材や家具などの素材からの放散量を測定し、放散源を特定することが必要となる。

実験室レベルの放散速度試験法としては、チャンバー法^{3)~7)}、デシケーター法⁸⁾、FLEC (Field and Laboratory Emission Cell, P.Wolkoff)⁹⁾等がよく使われている。

実態調査等、現場にも対応できるアクティブ測定法としては ISO 規格でもある FLEC がよく知られている。FLEC は現場測定と実験室試験の両方に対応できる長所を持っているが、アクティブ法であるためポンプ・ボンベ・空気調節装置等を必要とする。現場測定にアクティブ法を用いる場合、前述した装置が必要であるため実測者に多くの負担がかかる。また、居住状態では機器騒音等の問題もある。

放散試験によく使われるチャンバー法は試験装置、費用、人力、時間などを要するため数多く存在する建材を測定することは難しい。そこで、簡便に放散性能試験ができる試験法が求められてきた。また、現場測定においては簡便で騒音等がなく安価でありながら、精度の確保が可能な測定法が望まれる。機器を用いずパッシブサンプラーで化学物質の捕集を行う簡便な測定法として JIS A 1903「フラックス発生量測定法」¹⁰⁾が知られている。パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法は器具や装置等が軽量かつ簡便で、居住者が在室状態でも日常生活に支障を来さず建材からの化学物質放散量を測定できる。

日本で開発されたフラックス発生量測定法としては PFS¹¹⁾、TEA-Dish¹²⁾、DSAC¹³⁾、ADSEC¹⁴⁾等がある。

本研究では建材や家具などから放散される化学物質の放散性能を簡便に測定するためのフラックス発生量測定器具として、ステンレス (SUS304) 製の台形状小型セルの開発及び性能検証を行った^{14)~18)}。更に、合板、ボード類などの固体状の建材だけではなく塗料、接着剤、防水材など液状建材からの放散量を測定するための試験手法を提案し、再現性・精度試験などの検証試験を行った。

2.2 パッシブサンプラー及び小型セルの回収率

化学物質放散量試験において基本となるのは放散試験、捕集、分析の全課程における試験精度の偏差である。回収率が低いと一連の課程において対象物質の損失や欠落が多いことを意味するため、全試験課程の誤差を含めた回収率結果は安定かつ信頼性の高い試験の根幹となる。

フラックス発生量測定法で用いるパッシブサンプラー（VOC-SD）¹⁹⁾の各物質に対する直接添加回収率（分析回収率）及びフラックス発生量試験器具小型セルに物質を添加して分析を行った際の回収率については社団法人日本建材試験センターの長谷川あゆみら²⁰⁾により試験が行われている。小型セルによる回収率試験の概要を図 2-1 に、直接添加による回収率試験の概要を図 2-2 に示す。

その回収率試験概要と試験結果について文献調査を行った内容を以下にまとめる。

VOCs の回収率測定対象物質はトルエン、エチルベンゼン、m,p-キシレン、o-キシレン、スチレン、パラジクロロベンゼンの 6 成分であった。

小型セルによる回収率は、理論量に対してスチレンを除いては 80～90%程度であった。スチレンは 30%以下の低い回収率となったため、補正法を用いる必要があり、サロゲートによる補正を考慮することになっている。

直接添加の回収率に対しては、小型容器の回収率が若干下回る傾向にあったが、その差は 10%以内であった。

スチレンに関して、二硫化炭素（CS₂）を用いた活性炭等からのスチレンの溶出では、回収率が低くなることが知られている。添加回収実験から求めた回収率による補正がよく行われるが、スチレンは回収率が経時変化する場合が認められる。そのため、ここではサロゲートとして試料にスチレンの重水素置換体（d 体）を加え、一連の分析操作を行い、試料分析と同時に回収率を求めて補正した検討結果を示している。

パッシブサンプラーの吸着剤に、トルエン、エチルベンゼン、キシレン、スチレン、パラジクロロベンゼンの 1000μg/mL メタノール溶液を 3μL 添加し、封をして 24 時間保管し、3μg 添加サンプラーを作製した。内部標準物質として 1, 3, 5-トリメチルベンゼン-d₁₂ の 1000μg/mL メタノール溶液を 3μL 添加し（添加量 3μg）、二硫化炭素を 2mL 加えて、23℃において 30 分、60 分、120 分にそれぞれ溶出を行った。溶出後、GC/MS にて分析^{21) 22)}を行い、回収率の経時変化を確認した。溶出条件ごとに N=5 で実施した。

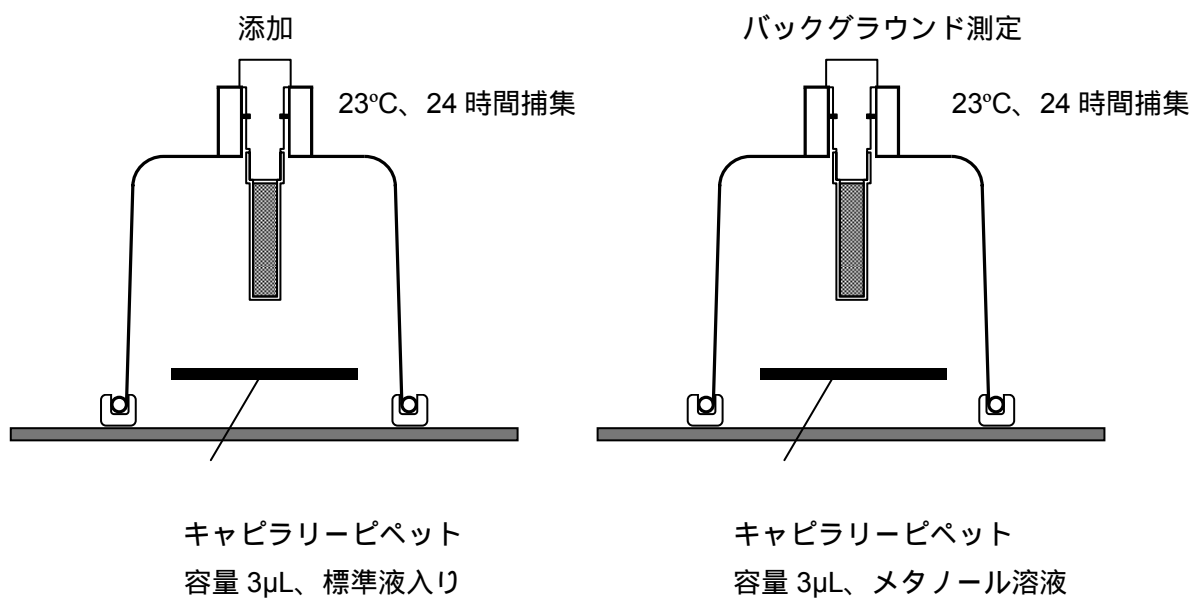


図 2-1 小型セルによる回収率試験

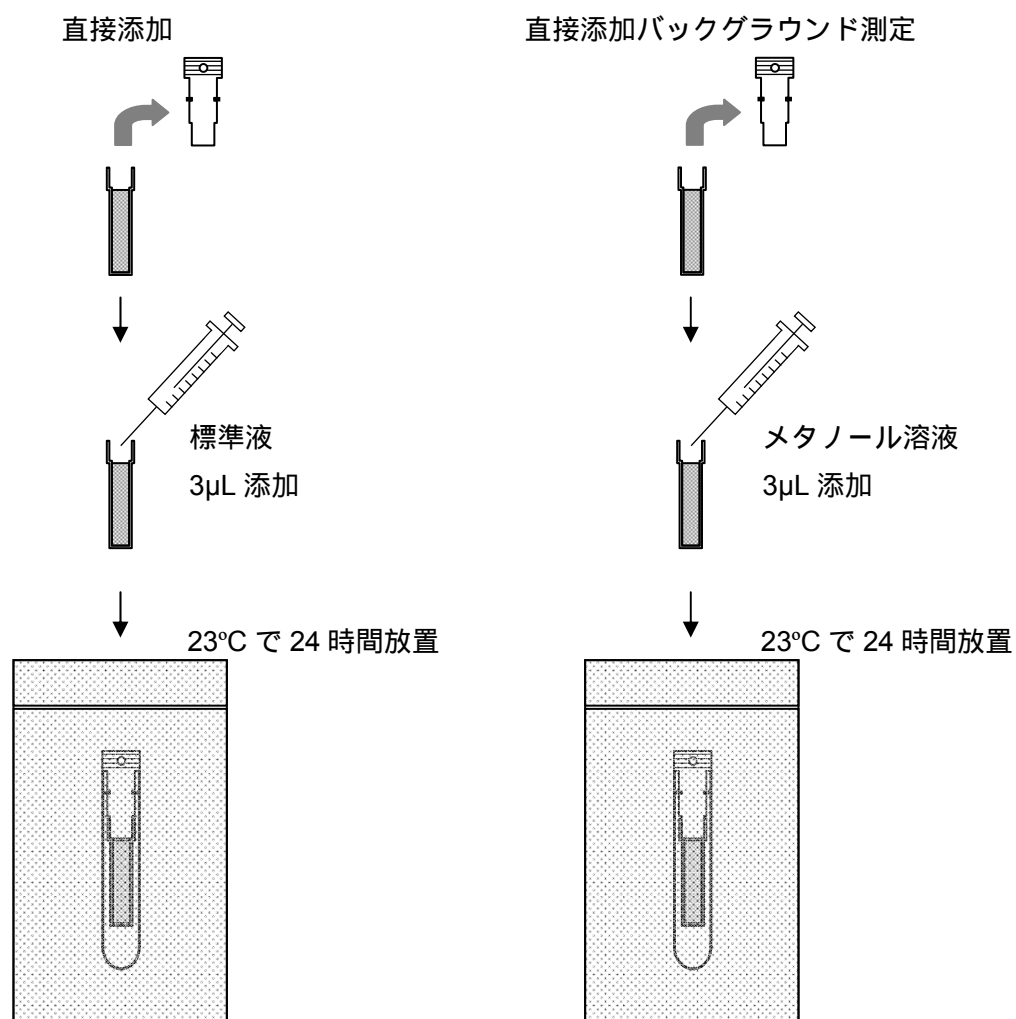


図 2-2 直接添加による回収率試験

また、パッシブサンプラーの吸着剤に、トルエン、エチルベンゼン、キシレン、スチレン、パラジクロロベンゼンの 1000 $\mu\text{g/mL}$ メタノール溶液を 3 μL 添加し、封をして 24 時間保管し、3 μg 添加サンプラーを作製し、吸着剤を取り出して、トルエン- d_8 、エチルベンゼン- d_{10} 、p-キシレン- d_4 、スチレン- d_8 、パラジクロロベンゼン- d_4 の 1000 $\mu\text{g/mL}$ メタノール溶液を 3 μL 添加し密栓をして 1 時間平衡化した。内部標準物質として 1, 3, 5-トリメチルベンゼン- d_{12} の 1000 $\mu\text{g/mL}$ メタノール溶液を 3 μL 添加し（添加量 3 μg ）、二硫化炭素を加えて、23 $^{\circ}\text{C}$ において 60 分溶出を行った。溶出後 GC/MS 測定を行い、回収率を求めた。

溶出時間の違いによる回収率の経時変化についての検討を行ったところ、いずれの化合物も比較的回収率が安定しているのに対し、スチレンは 120 分で回収率が低下することが分かった。回収率自体も 60%程度と低く、d 体の添加により溶出時間に依存せず回収率が補正できるとしている。

この結果から、スチレンは d 体の回収率補正によりほぼ 100%の回収率に補正できることが分かった。スチレン以外は、添加量の 80%以上回収されており、サロゲートによる補正は必要ないと結論づけている。

2.3 EPS からのフラックス発生量測定試験

2.3.1 目的

本試験では、建材の中でも大きな割合を占める合板、MDF、ボード類などの板状建材に対する小型セルの VOCs フラックス発生量試験性能を把握する。

パッシブ法の精度検証のために、トルエンの放散源として知られている断熱材用途の EPS（Expanded Polystyrene foam：発泡ポリスチレン）を用いて小型セルによるフラックス発生量測定及び 20L 小型チャンバーによる放散速度試験を行った¹⁵⁾。

2.3.2 試験概要

試験片として用いたトルエン放散 EPS は以下の 3 種類である。

高放散 EPS（キシレンが放散しないもの）

高放散 EPS（キシレンが放散するもの）

低放散 EPS

小型セル及びフラックス発生量測定試験の風景を図 2-3 に、試験概要を表 2-1 に示す。同一建材から採取した試験片を 2 枚ずつ用意し、試験片 1 枚当たり 2 本のサンプラーを設置する。即、1 種類の建材に対するサンプルの数は $n=4$ である。また、バッググラウンド測定として建材無し（Blank：ブランク）条件を加えた。小型セルと試験片との密封性を高めるため、保持器具を使用した。捕集は 1 日目（試料設置直後から 24 時間）、3 日目（2 日後から 3 日後まで）、7 日目（6 日後から 7 日後まで）に行った。捕集時間は 24 時間とし、メモリー式温湿度計を使用して雰囲気空気の温湿度を測定した。また、雰囲気空気中の化学物質濃度として恒温槽内気中濃度をアクティブ法（Tenax-TA 充填 Perkin Elmer Tube）を用いて捕集した。パッシブサンプラー VOC-SD の捕集剤は Caboxen564 であり、固体吸着－溶媒抽出で回収率の低いスチレンに関してはサロゲート添加による回収率補正を行った。



図 2-3 建材試験用小型セル及び建材試験風景

表 2-1 フラックス発生量測定法試験概要

項目		詳細	
		フラックス発生量（小型セル）	放散速度（20L 小型チャンバー）
サンプル		高放散 EPS（キシレンが放散しないもの） 高放散 EPS（キシレンが放散するもの） 低放散 EPS 建材無し（BLANK 測定）	
		、 、 サンプルを 各 2 枚 n=4 で行う。 但し、 BLANK 測定は、3 日目か らは行わない	、 、 のサンプルを n=1 で測定
温度		28±1°C	28±1°C
相対湿度		成り行き	50±5%RH
換気量		-	0.5 回/h（167ml/min）
捕集時期		1、3、7 日目 （1 日目とは試料投入後すぐサンプ ラーを設置、24 時間捕集が終わる まで）	1、3、7 日目 （1 日目とは試料投入 24 時間後）
捕集 分析	捕集条件	24 時間	3.2L（167ml/min） 但し、 及び のサンプルを測定時、 高放散のトルエンによる破瓜の虞が あるため、別途約 2 分（167ml/min） 捕集を行った
	サンプラー	VOC-SD（Carboxen 564）	Perkin Elmer Tube（Tenax-TA）
	分析	二硫化炭素溶媒抽出 GC/MS 分析	加熱脱着 GC/MS 分析

2.3.3 試験結果

各 EPS 試料の試験結果を表 2-2～2-4 に示す。

試験が行われる恒温槽内には活性炭を入れることにより、汚染物質のバックグラウンド濃度は十分低い値となっていた。また、スチレンにおいても回収率補正を行った結果、小型チャンバーのアクティブ法と同程度の値が得られた。

表 2-2 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験名	1 日目	3 日目	7 日目
トルエン	EPS -1	1769	735	478
	EPS -2	1685	683	492
	EPS -3	1938	610	449
	EPS -4	2022	673	468
	小型チャンバー	1128	779	477
エチル ベンゼン	EPS -1	42	19	12
	EPS -2	41	17	13
	EPS -3	46	16	13
	EPS -4	47	17	13
	小型チャンバー	34	21	15
キシレン	EPS -1	2	N.D.	N.D.
	EPS -2	2	N.D.	N.D.
	EPS -3	2	N.D.	N.D.
	EPS -4	2	N.D.	N.D.
	小型チャンバー	N.D.	N.D.	N.D.
スチレン	EPS -1	126	46	28
	EPS -2	125	43	28
	EPS -3	140	40	28
	EPS -4	140	43	30
	小型チャンバー	94	62	38

表 2-3 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験名	1 日目	3 日目	7 日目
トルエン	EPS -1	1601	581	363
	EPS -2	1516	636	363
	EPS -3	1432	565	332
	EPS -4	1432	532	329
	小型チャンバー	859	741	548
エチルベンゼン	EPS -1	34	14	9
	EPS -2	32	15	9
	EPS -3	31	14	8
	EPS -4	30	13	8
	小型チャンバー	25	18	14
キシレン	EPS -1	5	3	2
	EPS -2	5	3	2
	EPS -3	5	3	2
	EPS -4	5	3	2
	小型チャンバー	4	3	3
スチレン	EPS -1	214	88	55
	EPS -2	204	90	59
	EPS -3	201	83	53
	EPS -4	189	80	54
	小型チャンバー	164	121	94

表 2-4 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験名	1 日目	3 日目	7 日目
トルエン	EPS -1	2	2	N.D.
	EPS -2	2	2	N.D.
	EPS -3	3	2	N.D.
	EPS -4	2	5	N.D.
	小型チャンバー	1	1	1
エチルベンゼン	EPS -1	24	14	11
	EPS -2	24	14	12
	EPS -3	27	13	10
	EPS -4	26	14	11
	小型チャンバー	15	11	8
キシレン	EPS -1	2	2	N.D.
	EPS -2	2	2	N.D.
	EPS -3	2	2	N.D.
	EPS -4	2	2	N.D.
	小型チャンバー	N.D.	N.D.	N.D.
スチレン	EPS -1	30	18	13
	EPS -2	27	16	13
	EPS -3	34	16	11
	EPS -4	34	15	12
	小型チャンバー	17	12	9

各試料別のフラックス発生量及び放散速度試験結果を図 2-4～2-6 に示す。

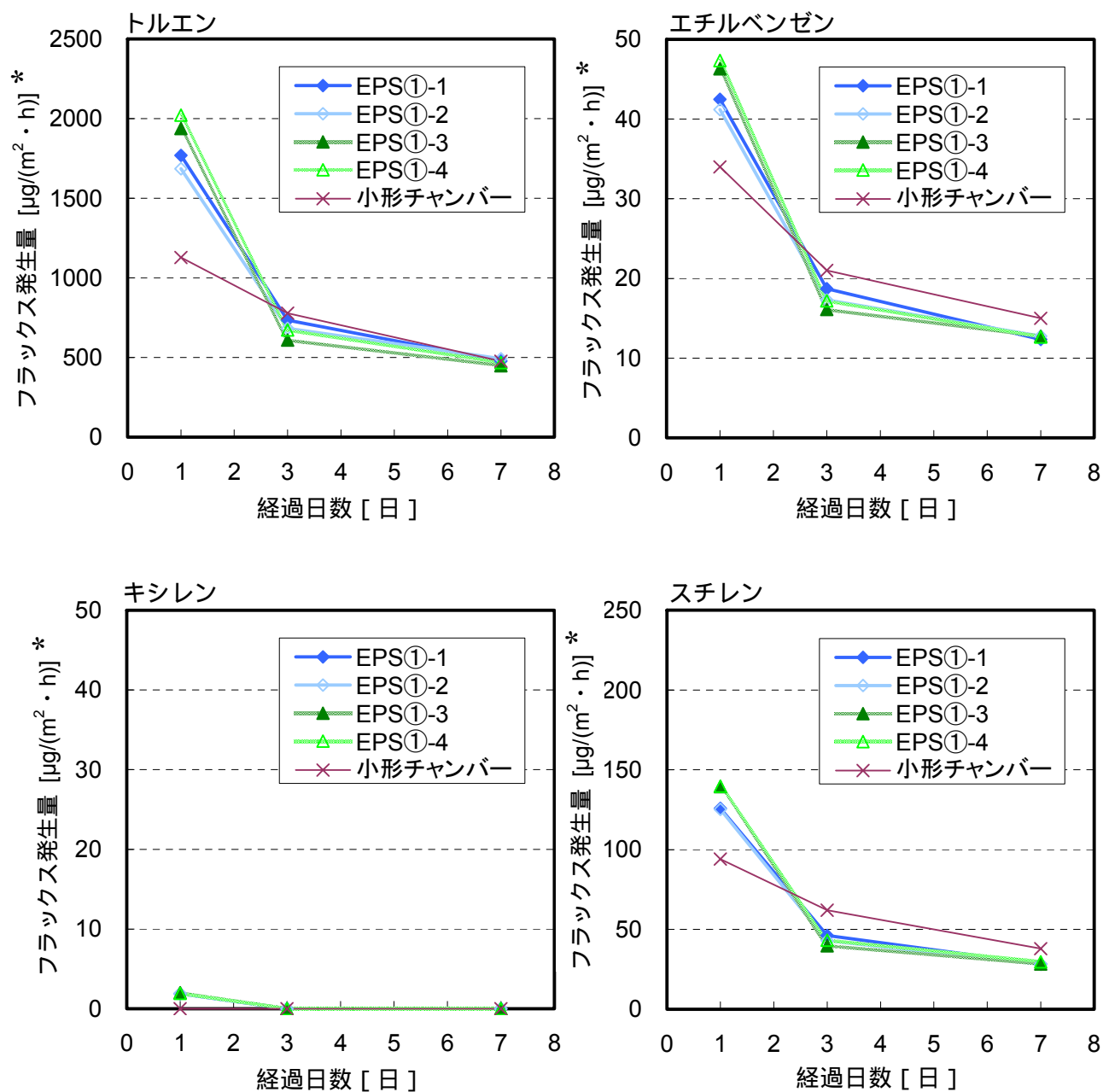
各物質に対する測定結果はサンプル 4 つ共に同等な値を示し、偏差が少なく再現性のよい結果が得られている。

小型セルと小型チャンバー法の結果は1日目を除いて、3日目・7日目共によく一致した。1日目のフラックス発生量は、小型チャンバー法の1日目の放散速度測定値より高くなった。小型チャンバー法は換気を行いながら試験する方法であり、常時 0.5 回/h 換気が行われている。また、試験片投入から 15～24 時間後に1日目のサンプリングを行う。一方、フラックス発生量測定法は建材設置後すぐ建材面に小型セルを被せ、パッシブサンプラーを挿入したまま 24 時間の捕集を行う。換気を行わないため測定期間中は完全密閉状態となり、減衰が少ない試験初期には高濃度に暴露されてしまう。そのため、1日目の測定結果は小型チャンバー法より高くなる。しかし、このことは1日目は安全側の測定ができることを意味する。

EPS からの化学物質放散量は時間経過と共に減衰し、3日目は小型チャンバー法より若干低く、7日目には小型チャンバー法と同等な結果が得られた。

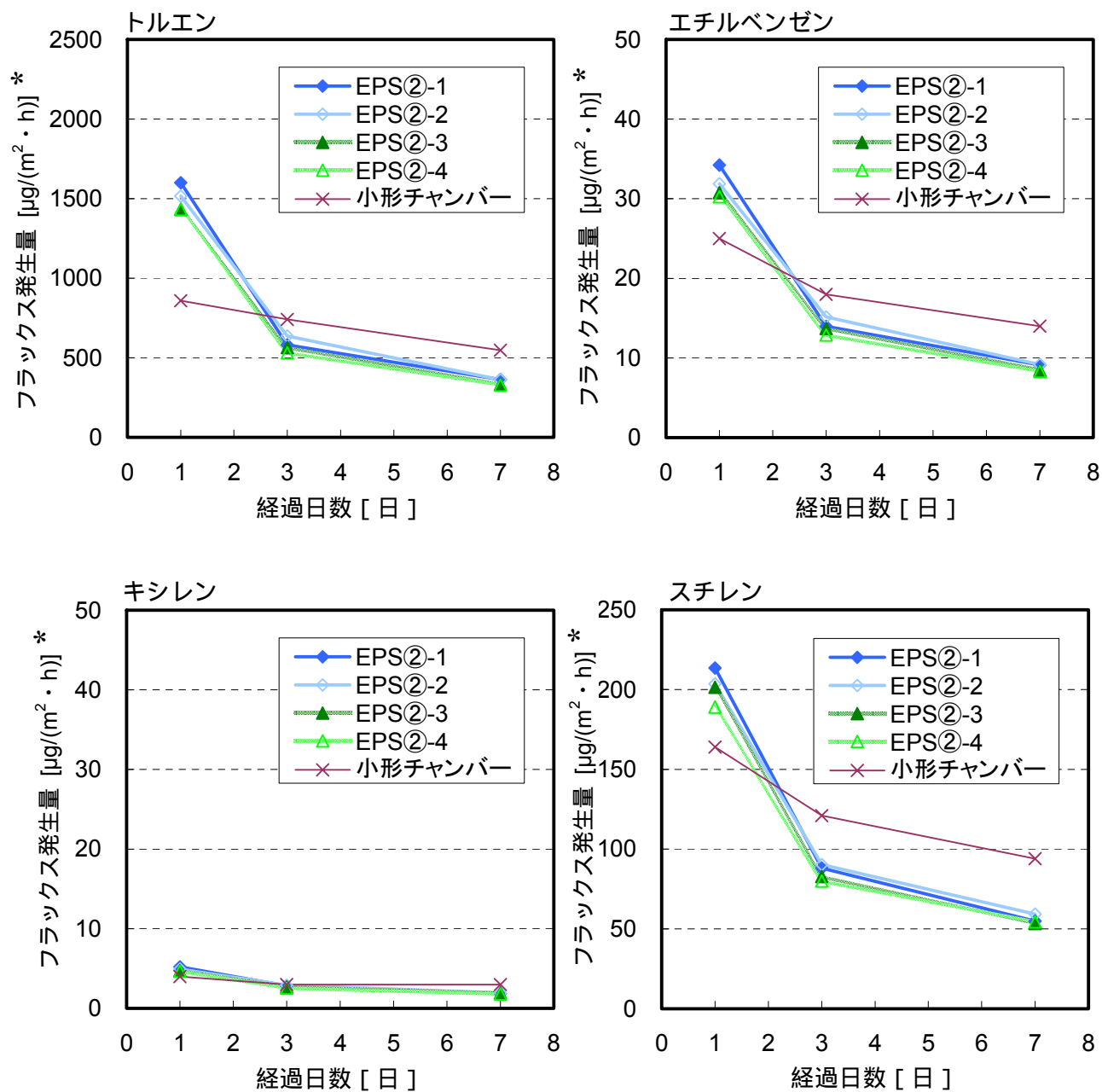
そこで、フラックス発生量測定法は1日目には小型チャンバー法の結果より高くなり、安全側の測定ができるため、多数の試料に対して簡便に試験を行う必要があるスクリーニングテストに適合していることが分かる。

また、3日目以降はチャンバー法の結果値と同等な結果が得られるため、チャンバー試験が行えない現場や、チャンバー装置が備えられていない研究所などではチャンバー試験の代わりに建材の放散性能の目安として使用できる試験法である。



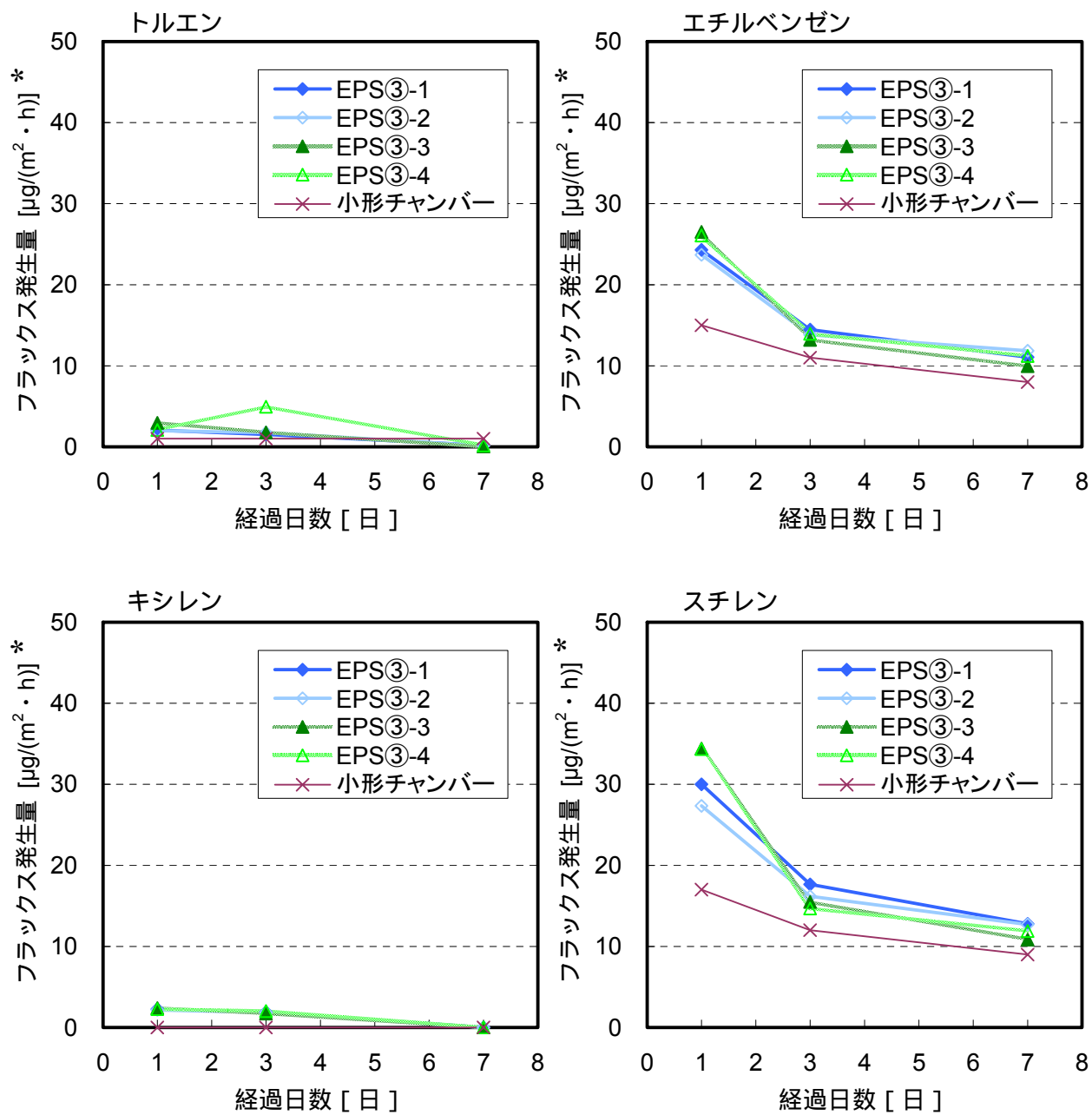
*小型チャンバーの値は放散速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

図 2-4 EPS 結果



*小型チャンバーの値は放散速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

図 2-5 EPS 結果



*小型チャンバーの値は放散速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

図 2-6 EPS 結果

2.4 接着剤からのフラックス発生量測定法の開発

2.4.1 目的

JIS A 1901「小型チャンバー法」は、建材・施工材からのカルボニル化合物及び VOCs の測定方法について規定しているが、接着剤、塗料、防水剤などの建材は、液状であるため木材やボード類などの固体状建材と同様の方法で測定することが難しい。また、接着剤からの VOCs 測定においては VOCs 放散の基材依存性と試料作製方法及び作製時間、養生時間が問題となる。

従来のガラス板に接着剤を塗布して試験する方法（JIS A 1902-2）²³⁾は、実際の建築現場における使用方法と異なり、含有化学物質が短時間で放散・減衰してしまう問題がある。

そこで、本研究では実際の使用形態と近い状態となるような試験片の作製方法を提案し、小型チャンバー法と小型セル法を用いた放散試験を行い^{16) 17) 18)}、液状建材に関する放散試験法を確率することを目的とした。

2.4.2 基材の検討

接着剤から放散する VOCs の測定においては基材依存性が大きな問題となる。そこで本研究では実際の使用条件に近づけるため、基材を接着剤で貼りあわせ、基材に浸透・拡散・透過して放散する VOCs を測定する方法を提案する。

基材に求められる条件としては

- (1) 透過性がある
- (2) 揮発成分の急激な初期放散を防ぎ、放散量を長期間に渡って安定させる
- (3) 基材自体からの揮発性有機化合物の放散が少ない
- (4) 同質のものを簡単に入手でき、安価である

が挙げられる。

これらの条件を満たす建材として JIS A 5430²⁴⁾で規定されている「けい酸カルシウム板」に着目した。

基材からはなるべく汚染物質の放散がないことが望ましい。そのため 20L 小型チャンバーを用いて基材からの放散試験を行った。その結果を表 2-5 に示す。

試験結果から、ステンレス板及びけい酸カルシウム板からの化学物質放散は少なく、基材からの放散による試験結果への影響はないものと判断した。よって、けい酸カルシウム板を基材とした試験片を作製して放散速度及びフラックス発生量測定試験を行ってゆくこととした。

表 2-5 基材検討のための小型チャンバー試験結果（1日目の捕集量 [ng]）

物質名	接着剤塗布				バックグラウンド	
	12mm	8mm	6mm	ガラス	SUS* ¹	SiCaO ₃ * ²
n-ヘキサン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2,4-ジメチルペンタン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ヘプタン	0.4	0.6	0.6	0.4	0.2	N.D.
オクタン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ノナン	0.1	0.2	0.3	0.3	N.D.	N.D.
デカン	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2
ウンデカン	N.D.	0.6	0.1	N.D.	N.D.	N.D.
ベンゼン	0.1	0.1	0.1	0.1	N.D.	N.D.
トルエン	183.1	306.2	303.5	139.7	0.5	N.D.
エチルベンゼン	15.9	40.0	48.2	35.0	0.2	N.D.
m/p-キシレン	50.4	128.7	156.8	125.9	0.3	N.D.
o-キシレン	17.9	51.9	65.3	62.0	0.1	N.D.
スチレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
1,3,5-トリメチルベンゼン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
1,2,4-トリメチルベンゼン	0.1	0.2	0.1	0.1	N.D.	N.D.
1,2,3-トリメチルベンゼン	N.D.	0.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
α-ピネン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
D-リモネン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
クロロホルム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
1,2-ジクロロエタン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
1,1,1-トリクロロエタン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
四塩化炭素	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
1,2-ジクロロプロパン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ジブロモクロロメタン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
トリクロロエチレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
テトラクロロエチレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
p-ジクロロベンゼン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
酢酸エチル	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
酢酸ブチル	N.D.	0.5	1.4	3.3	N.D.	N.D.
メチルエチルケトン	0.2	1.0	1.1	0.4	N.D.	N.D.
メチルイソブチルケトン	0.9	0.9	2.1	N.D.	N.D.	N.D.
1-ブタノール	1.3	1.8	14.7	4.5	N.D.	N.D.

12mm, 8mm, 6mm はそれぞれけい酸カルシウム板の厚さである

*¹ ステンレス板、*² けい酸カルシウム板

2.4.3 けい酸カルシウム板を用いた試験片

施工現場でのオープンタイムを考慮し、また初期減衰を遅延させるために、試験片作製時間は10分以内とする。また、開放堆積時間は5分とする。

養生時間は試験片作製10分を含め60分とする。最初に接着剤を塗布したけい酸カルシウム板を上板とし、フラックス発生量測定法では上面からの放散量を測定する。

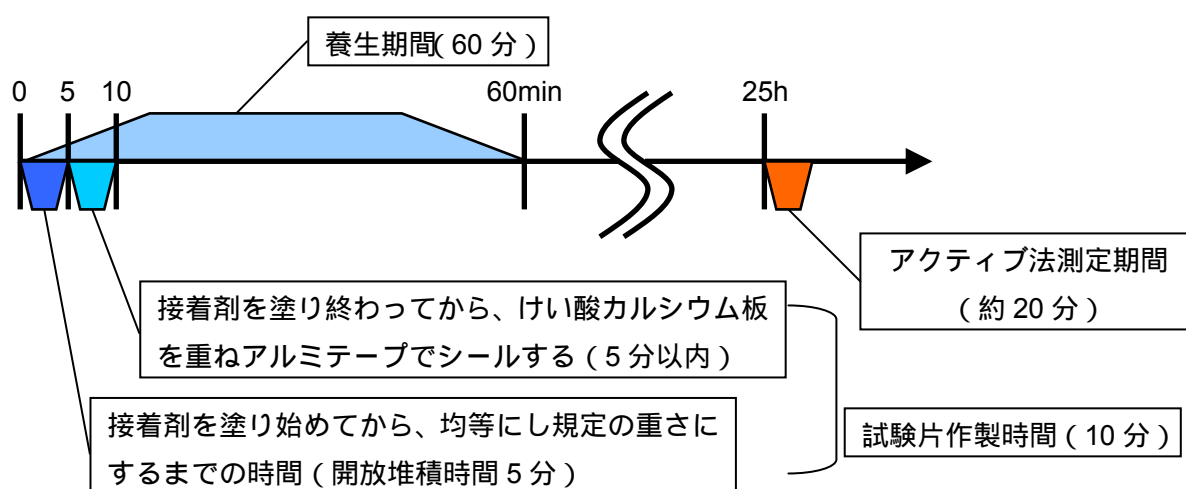


図 2-7 養生時間の定義

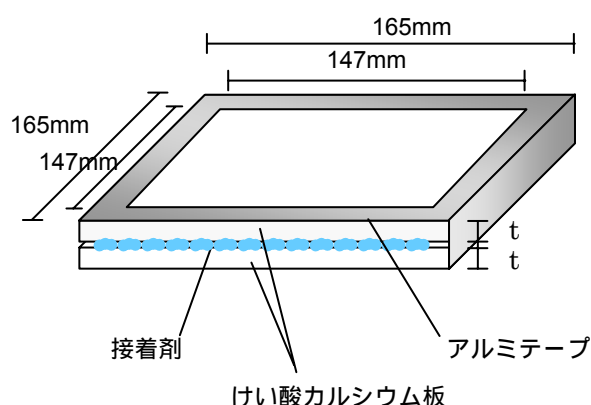
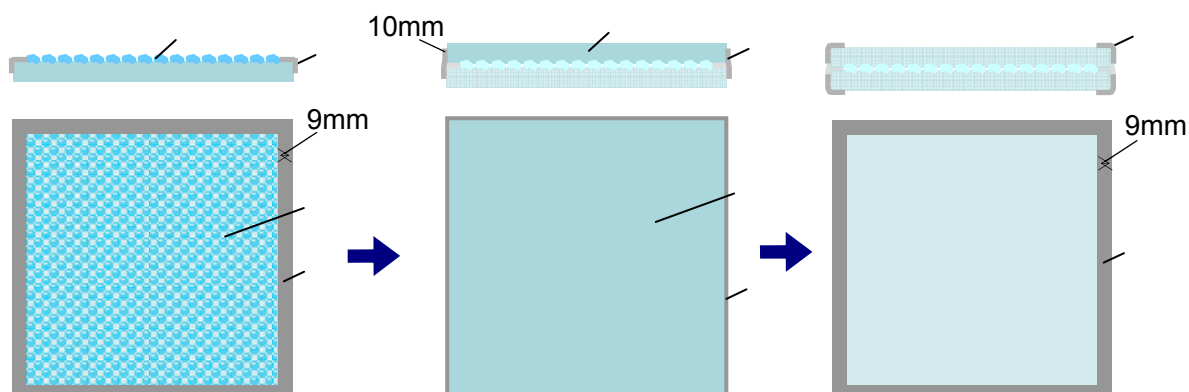


図 2-8 試験片完成図



けい酸カルシウム板に147mm×147mmになるようにアルミテープ（12mm）で枠を作る。（9mm残し、あとの3mmは側面に折り返す）

接着剤を $300 \pm 5\text{g/m}^2$ （6.39～6.58g）になるようにできるだけ均一に塗布する。

けい酸カルシウム板をかぶせる。

周囲をアルミテープ（10mm）でとめる。

けい酸カルシウム板の放散面積が147mm×147mmになるように上下に

アルミテープ（12mm）で枠を作る。（と同様）

* ～ の作業時間は凡そ10分

* ～ の作業時間は5分

図 2-9 試験片作製手順

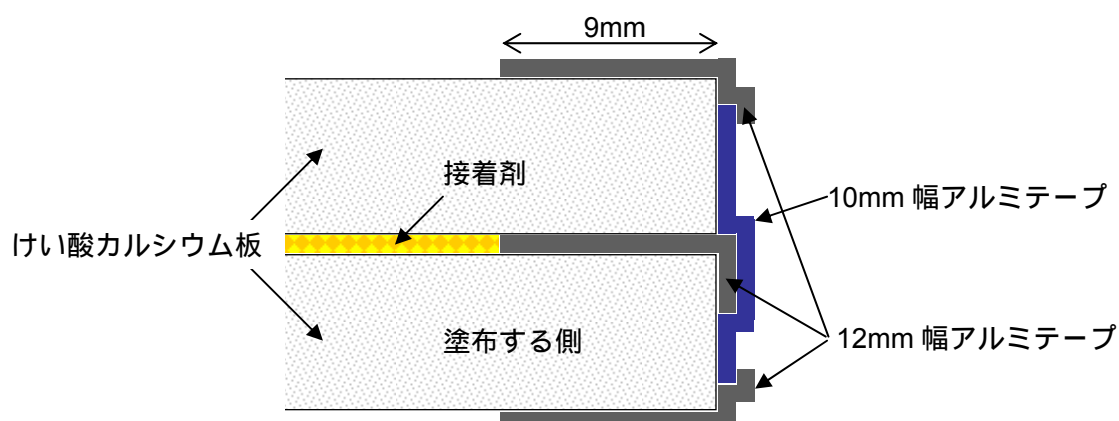


図 2-10 端部断面詳細

2.4.4 けい酸カルシウム板を用いた試験片の放散性能試験

(1) 既存試験法の試験条件

JIS A 1902「接着剤—揮発性有機化合物（VOC）、ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物等の放散速度測定におけるサンプル採取、試験片作製及び試験条件」での試験条件を表 2-6 に示す。

JIS A 1902 では試料負荷率と養生条件が可変となっているが、既往の研究から試料負荷率が小さくなる（ $0.4\text{m}^2/\text{m}^3$ ）と定量下限周辺でバラツキが見られた。そのため、JIS A 1901「小型チャンバー法」で採用している試料負荷率 $2.2\text{m}^2/\text{m}^3$ で試験を行うこととした。また、養生時間に関しては 24 時間養生を行うと化学物質の多くが揮発してしまうため、60 分とした。

表 2-6 接着剤からの放散量試験条件（JIS A 1902 による）

項 目		準通則で規定される試験条件
測定条件	小型チャンバー試験温度	$28 \pm 1^\circ\text{C}$
	小型チャンバー試験相対湿度	$50 \pm 5\%\text{RH}$
	換気回数	0.5 ± 0.05 回/h
	試料負荷率	$0.4 \sim 2.2\text{m}^2/\text{m}^3$
養生条件	温度	$23 \pm 2^\circ\text{C}$
	養生時間	60 ± 10 分 \sim 24 ± 3 時間
その他 条件	塗布量	$300\text{ g}/\text{m}^2$
	測定日	3 日目
	試験片	1 試験片
	サンプリング	2 回
	分析回数	1 回

(2) フラックス発生量及び放散速度試験概要

小型チャンバー法を用いて 6、8、12mm 厚のけい酸カルシウム板で作製した試験片の放散傾向を調べ、測定に用いる基材の最適な厚みの検討を行った。また、けい酸カルシウム（貼り合わせ）と、ガラス板（貼り合わせなし）の放散傾向の比較を行った。けい酸カルシウム板は両面放散で、ガラス板は片面放散の試験片を 2 枚使うことで試料負荷率 $2.2\text{m}^2/\text{m}^3$ とした。

更に、フラックス発生量測定法を用いて同条件での試験を行い、試験片用基材としての放散性能について検討した。試験条件を表 2-7 に、フラックス発生量測定法¹⁰⁾の概要図を図 2-11 に、小型チャンバー法³⁾⁴⁾の概要図を図 2-12 に示す。

両試験ともに、エマルジョン系接着剤に 0.05%Wt のトルエン、キシレンを添加、攪拌し接着剤を作製する。その接着剤と、165mm×165mm に切り出したけい酸カルシウム板を用いて試験片を作製した。捕集は、1、3、5、7 日目に行う。

但し、小型チャンバー法は試験片養生後（60 分間）すぐチャンバーに投入し、最初の捕集が行われるのは 18 時間～24 時間後になるのに対し、フラックス発生量測定法は試験片養生後（60 分間）試験片を設置してすぐ捕集を開始し 24 時間の捕集を行う。

表 2-7 試験条件

	小型セル法	小型チャンバー法
養生時間	60 分（試験片作製 10 分を含む）	
接着剤	床施工用アクリルエマルジョン系	
添加物質	トルエン、キシレン	
添加量	0.05%Wt	
基材	けい酸カルシウム板（6、8、12mm） ガラス板（3mm）	
塗布量	$300 \pm 5\text{g}/\text{m}^2$	
設定温度	$28 \pm 1^\circ\text{C}$	
相対湿度	50±5%（恒温恒湿槽内湿度）	50±5%（チャンバー内湿度）
換気回数	-	0.5 回/h
試料負荷率	-	$2.2\text{m}^2/\text{m}^3$
測定日	1、3、5、7 日目	
捕集管	VOC-SD（Carboxen564）	Perkin Elmer Tube（Tenax-TA）
分析	溶媒抽出、GC/MS	加熱脱着、GC/MS

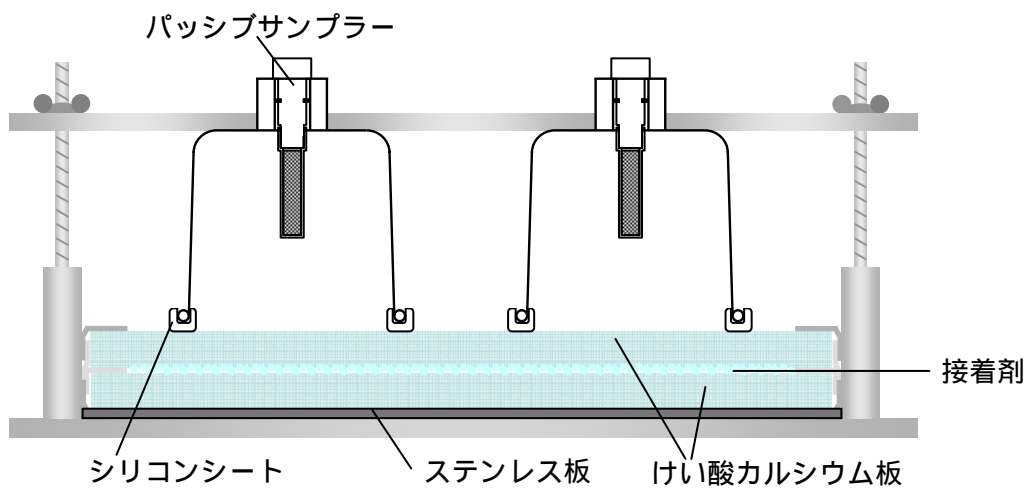


図 2-11 小型セルによるフラックス発生量測定試験概要図

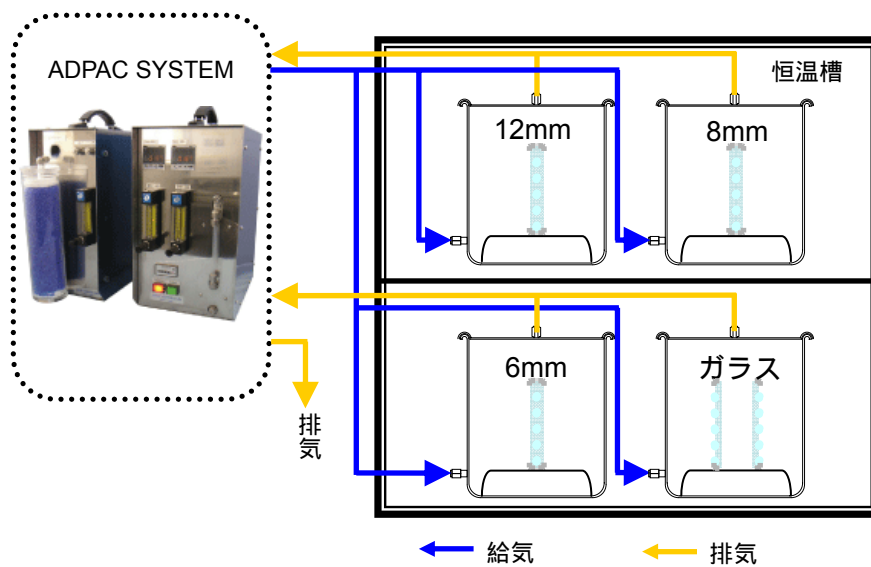


図 2-12 小型チャンバーによる放散速度試験概要図

(3) 小型チャンバー法による放散速度試験結果

小型チャンバー法による放散速度試験結果を表 2-8 及び図 2-13 に示す。

添加物質はトルエンとキシレンであるが、キシレン溶液には元々エチルベンゼンが含まれているため試験結果でもエチルベンゼンの放散が見られる。そのため、試験結果としてトルエン、エチルベンゼン、キシレンの放散速度を示す。

表 2-8 小型チャンバー法試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験片	1 日目	3 日目	5 日目	7 日目
トルエン	12mm	198	21	2	1
	8mm	116	2	1	N.D.
	6mm	72	1	1	1
	ガラス	16	1	N.D.	N.D.
エチル ベンゼン	12mm	69	13	4	1
	8mm	55	5	1	N.D.
	6mm	49	2	N.D.	N.D.
	ガラス	11	1	N.D.	N.D.
キシレン	12mm	292	73	26	9
	8mm	255	36	6	2
	6mm	248	18	2	1
	ガラス	79	4	1	N.D.

1、3、5 日目の結果においては建材厚が厚いほど高い放散速度となった。7 日目のトルエン結果においてはすべての試験片で $1\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 以下となった。

キシレン、エチルベンゼンにおいてはトルエンと同様の傾向で減衰しているが、トルエンに比べ揮発性が低いため、初期放散量を基準にした場合、時間経過後もトルエンより高い放散速度を示している。

ガラス板に塗った接着剤の放散速度はすべての試験日で、けい酸カルシウム板を用いた試験片より低い値を示し、減衰が早いことが分かる。このことから従来のガラス板を用いた測定方法では VOCs 放散が急速に進行し減衰が早く、結果として危険側の測定値となる。

このことから、接着剤の放散性能を評価する試験にはけい酸カルシウム板を用いることが望ましく、厚いけい酸カルシウム板ほど安全側の測定ができることが明らかになった。

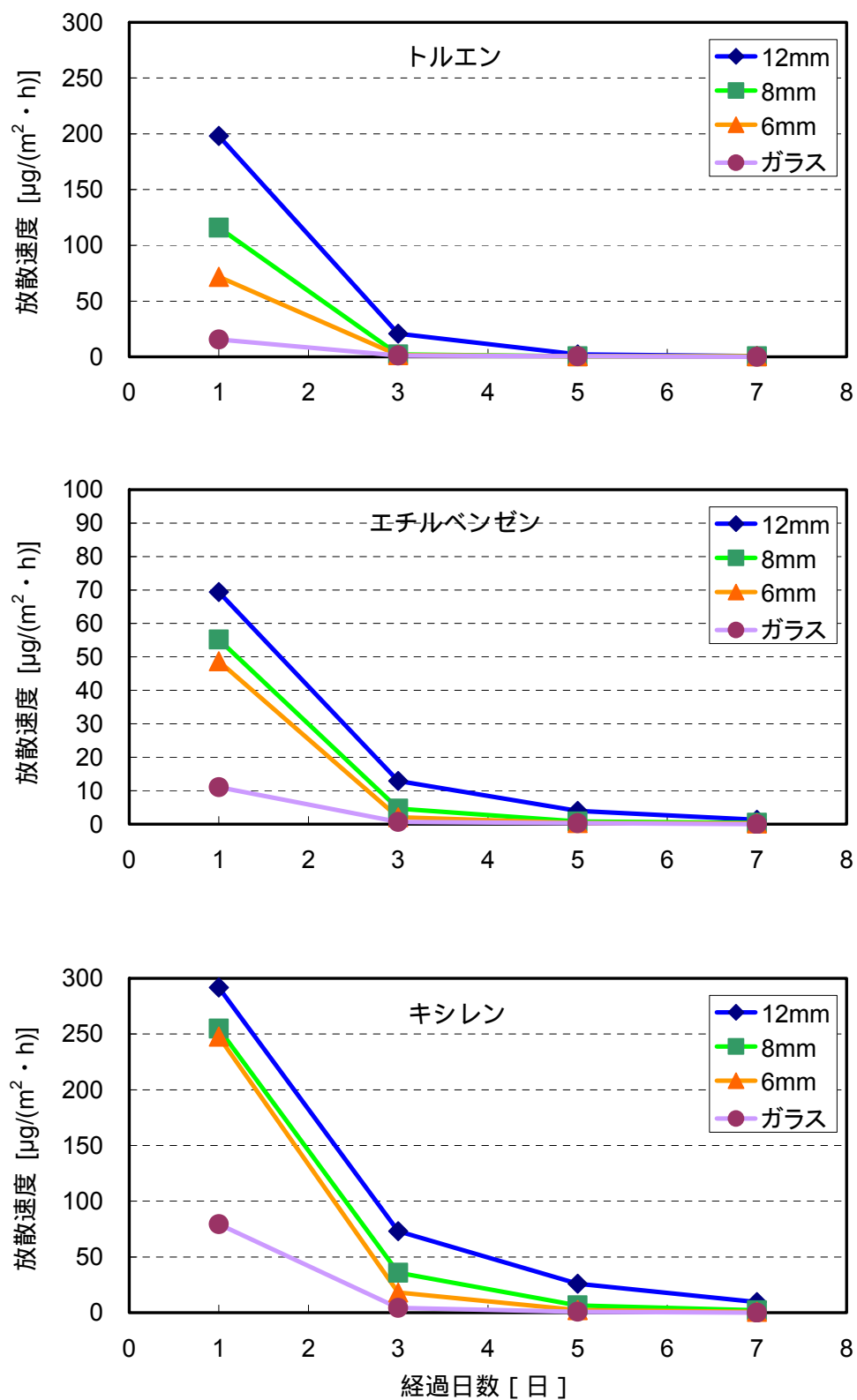


図 2-13 小型チャンバー法による放散速度試験結果

(4) 小型セル法によるフラックス発生量測定試験結果

小型セル法によるフラックス発生量測定試験結果を表 2-9、図 2-14 に示す。

添加物質はトルエンとキシレンであるが、キシレン溶液には元々エチルベンゼンが含まれているため、試験結果としてトルエン、エチルベンゼン、キシレンの放散速度を示す。

パッシブ測定法は試験片 1 枚当たり左右 2 本のサンプラーが同時に設置できる仕組みであり、ダブルサンプリングを行った。結果より、左右サンプラー間の差は小さく、塗りムラ等による影響は小さいと考えられた。

けい酸カルシウム板の 1 日目の結果で、トルエンにおいては 8mm 板が、キシレン、エチルベンゼンにおいては 6mm 板が最も高い値を示した。3 日目以降は基材厚が厚いほど高いフラックス発生量となっており、基材が厚いほど内部の化学物質は時間をかけて放散されていることが確認された。

1 日目と 3 日目以降の物質による放散性状が異なる理由は、揮発性の違いと考えられる。揮発性の高いトルエンにおいて、1 日目には 8mm 板が放散のピークとなっており、6mm 板は拡散抵抗となる板が薄いため 8mm 板より早い時期にピークが現れ、12mm 板はまだ放散のピークを表していなかったと考えられる。

一方、揮発性がトルエンより低いエチルベンゼンとキシレンにおいては、1 日目に 6mm 板の方が最も高い放散量を示した。

エチルベンゼン $[(C_6H_5)C_2H_5]$ とキシレン $[(CH_3)_2C_6H_4]$ は分子量が同じで分子構造が異なる物質であり、分子サイズがほぼ同じであるため似た拡散挙動を示したと考えられる。

ガラス板において、1 日目の結果はけい酸カルシウム板試験片より低い値となり、3 日目以降は放散が殆ど見られなかった。小型セル法における 3 日目の測定値は 2 日目から 3 日目までの 24 時間平均値であるため、2 日目の時点で既に低いフラックス発生量となっていたと考えられる。

以上の試験結果から、けい酸カルシウム板試験片が厚いほど 1 日目の試験結果値は低くなり、時間が経過しても放散を続け、VOCs の急激な初期放散を抑制できることが明らかになった。

けい酸カルシウム板を用いた試験片は初期放散を抑制し、急激な初期減衰を防ぐことができることから、ガラス板を用いた試験法より安全側の測定ができる。また 12mm 厚のけい酸カルシウム板を用いれば 7 日目までの測定が可能であった。

接着剤、塗料などの液状建材からの化学物質放散性能試験では、けい酸カルシウム板を基材とした試験片がガラス板より試験性に優れており、また安全側の測定結果が得られることから実効性及び実用性が確認された。

表 2-9 小型セル法によるフラックス発生量測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験片	1日目	3日目	5日目	7日目
トルエン	12mm-L	1674	131	7	N.D.
	12mm-R	1407	107	5	N.D.
	8mm-L	2545	9	N.D.	N.D.
	8mm-R	2612	11	N.D.	N.D.
	6mm-L	2610	N.D.	N.D.	N.D.
	6mm-R	2501	1	N.D.	N.D.
	ガラス-L	1223	N.D.	N.D.	N.D.
	ガラス-R	1125	N.D.	N.D.	N.D.
エチル ベンゼン	12mm-L	146	48	13	4
	12mm-R	120	40	11	3
	8mm-L	332	16	2	1
	8mm-R	340	18	2	1
	6mm-L	416	6	2	1
	6mm-R	395	8	1	1
	ガラス-L	311	2	1	1
	ガラス-R	277	2	1	1
キシレン	12mm-L	625	249	73	21
	12mm-R	521	206	58	16
	8mm-L	1503	92	7	N.D.
	8mm-R	1538	107	9	N.D.
	6mm-L	1917	31	N.D.	N.D.
	6mm-R	1824	47	N.D.	N.D.
	ガラス-L	1668	1	N.D.	N.D.
	ガラス-R	1494	1	N.D.	N.D.

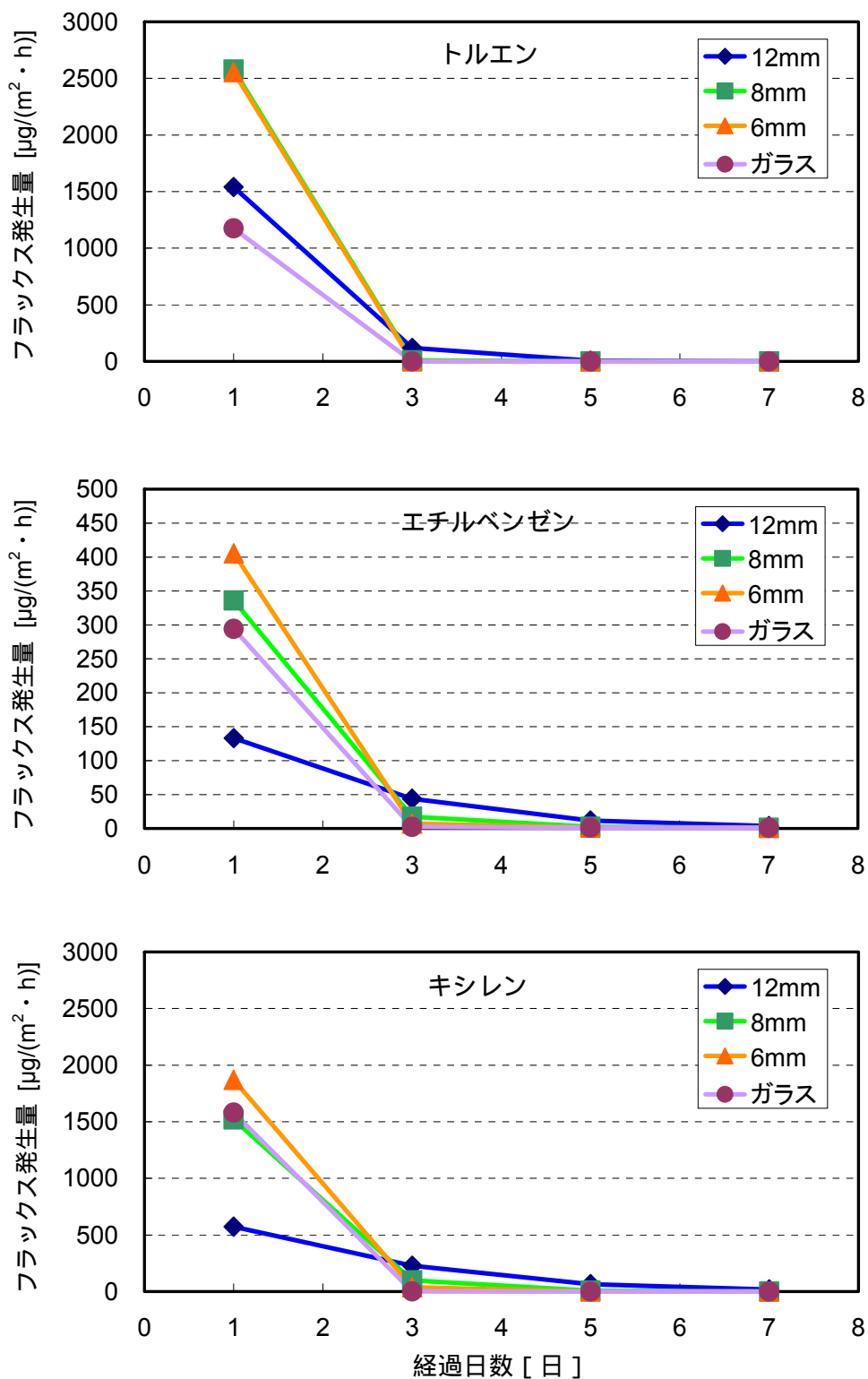


図 2-14 小型セル法によるフラックス発生量測定結果 (左右平均値)

(5) フラックス発生量と放散速度結果の比較

小型セル法と小型チャンバー法の結果比較を表 2-10、また比較グラフを図 2-15～2-18 に示す。トルエンに対する小型チャンバー法 1、3、5 日目の結果においては、けい酸カルシウム板厚が厚いほど高い放散速度となった。7 日目のトルエン結果においてはすべての試験片で $1\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 以下となった。キシレン、エチルベンゼンにおいてはトルエンと同様の傾向で減衰しているが、トルエンの方が揮発性が高いため初期放散が高いが、キシレン・エチルベンゼンは日数経過後も放散が続く傾向を示した。ガラス板に塗布した接着剤からの放散速度はすべての条件で 3 種のけい酸カルシウム板試験片よりも低い値を示し、初期減衰が早いことが確認された。

フラックス発生量測定法の同一試験片に対して同時に捕集を行う左右のサンプラー間の差は小さく、塗りムラ等による影響は小さかった。1 日目の結果でトルエンにおいては 8mm が、キシレン、エチルベンゼンにおいては 6mm が最も高い値を示した。3 日目以降は基材厚が厚いほど高いフラックス発生量となっており、基材が厚いほど化学物質は時間をかけて放散されることが確認された。ガラス板においては 1 日目以降は殆ど放散が見られなかった。

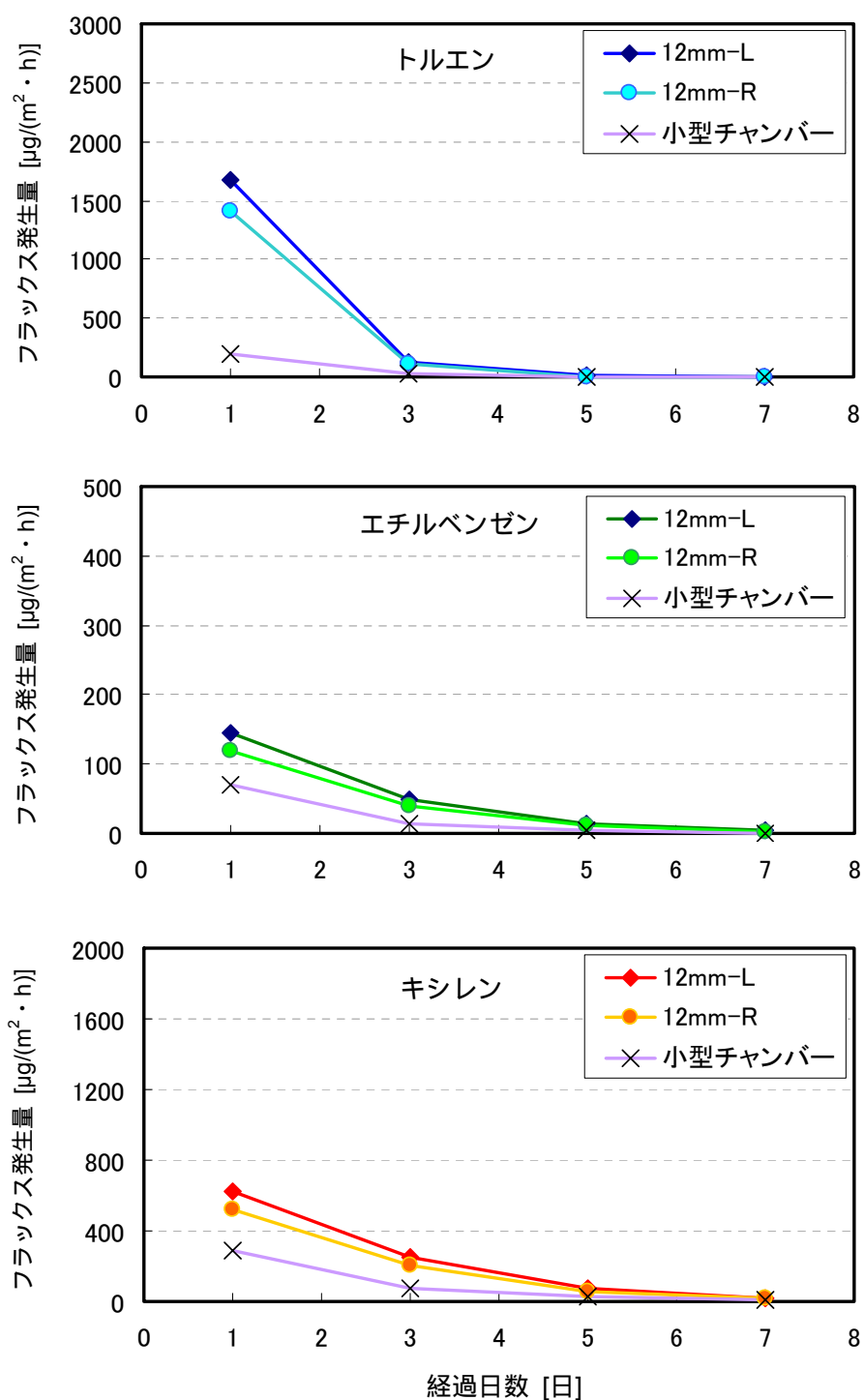
小型セル法と小型チャンバー法の傾向はよく一致した。但し、小型チャンバー法と小型セル法の比較では 1 日目の結果において差が見られた。これは小型チャンバー法が試料設置から 15～24 時間後の瞬時値を測定するのに対し、小型セル法は試料設置直後から 24 時間の平均値を測定するためである。

12mm 厚の試験片は 1、3、5 日目の結果において小型セル法が小型チャンバー法を下回ることではなく、安全側の測定ができることが確認された。但し、7 日目は減衰が進んで定量限界以下若しくは微量のみ検出されたため比較は難しかった。

以上の結果から、液状建材からの化学物質放散量測定には、けい酸カルシウム板を用いた試験片を用いることで試験の信頼性及び再現性を高め、小型セルによるフラックス発生量測定法を用いた放散試験を行うことで簡便かつ容易に建材からの放散量測定が可能であった。

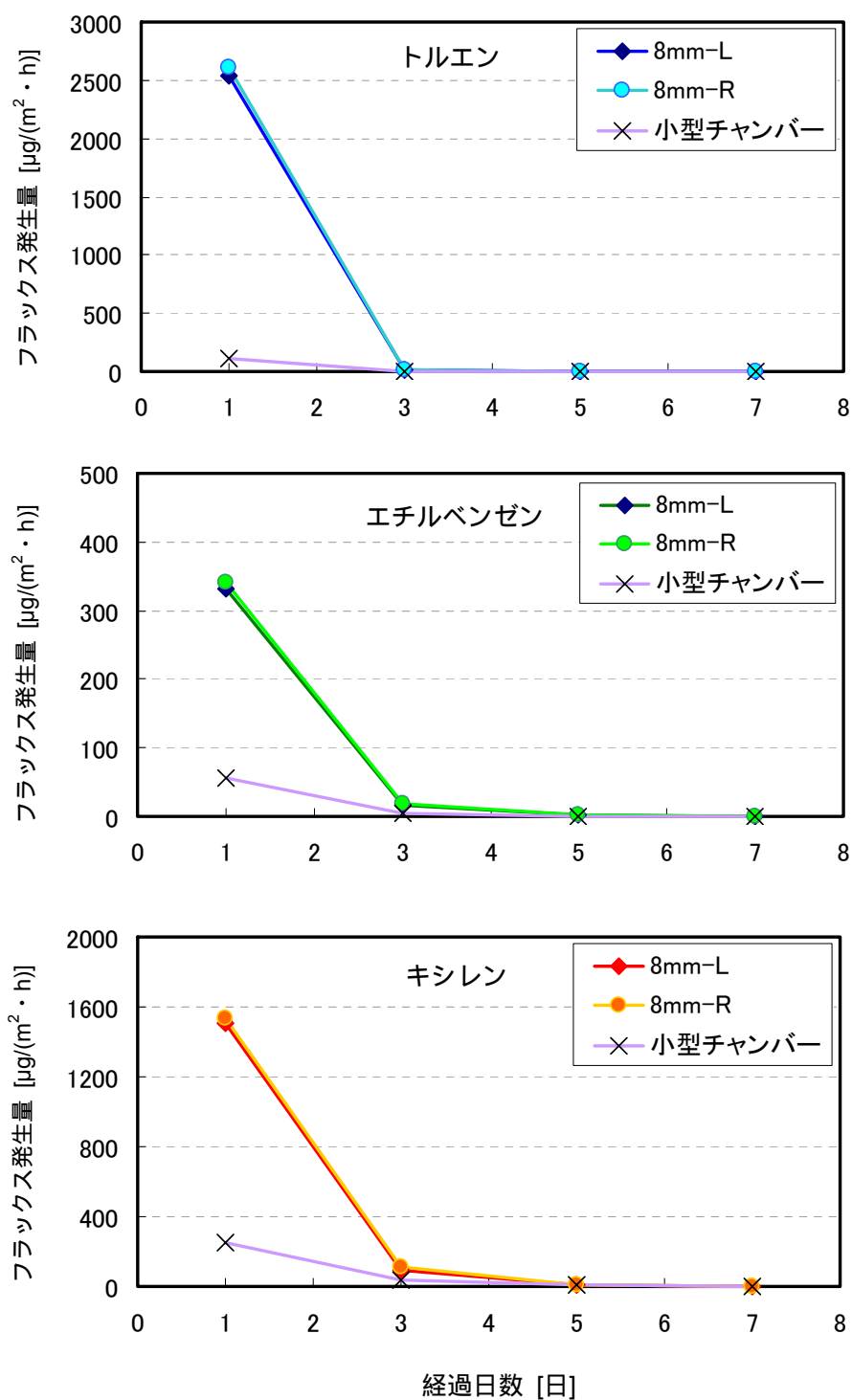
表 2-10 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

	基材厚さ	試験名	1 日目	3 日目	5 日目	7 日目
トルエン	12mm	12mm-L	1674	131	7	N.D.
		12mm-R	1407	107	5	N.D.
		小型チャンバー	198	21	2	1
	8mm	8mm-L	2545	9	N.D.	N.D.
		8mm-R	2612	11	N.D.	N.D.
		小型チャンバー	116	2	1	N.D.
	6mm	6mm-L	2610	N.D.	N.D.	N.D.
		6mm-R	2501	1	N.D.	N.D.
		小型チャンバー	72	1	1	1
	ガラス	ガラス-L	1223	N.D.	N.D.	N.D.
		ガラス-R	1125	N.D.	N.D.	N.D.
		小型チャンバー	16	1	N.D.	N.D.
エチルベンゼン	12mm	12mm-L	146	48	13	4
		12mm-R	120	40	11	3
		小型チャンバー	69	13	4	1
	8mm	8mm-L	332	16	2	1
		8mm-R	340	18	2	1
		小型チャンバー	55	5	1	N.D.
	6mm	6mm-L	416	6	2	1
		6mm-R	395	8	1	1
		小型チャンバー	49	2	N.D.	N.D.
	ガラス	ガラス-L	311	2	1	1
		ガラス-R	277	2	1	1
		小型チャンバー	11	1	N.D.	N.D.
キシレン	12mm	12mm-L	625	249	73	21
		12mm-R	521	206	58	16
		小型チャンバー	292	73	26	9
	8mm	8mm-L	1503	92	7	N.D.
		8mm-R	1538	107	9	N.D.
		小型チャンバー	255	36	6	2
	6mm	6mm-L	1917	31	N.D.	N.D.
		6mm-R	1824	47	N.D.	N.D.
		小型チャンバー	248	18	2	1
	ガラス	ガラス-L	1668	1	N.D.	N.D.
		ガラス-R	1494	1	N.D.	N.D.
		小型チャンバー	79	4	1	N.D.



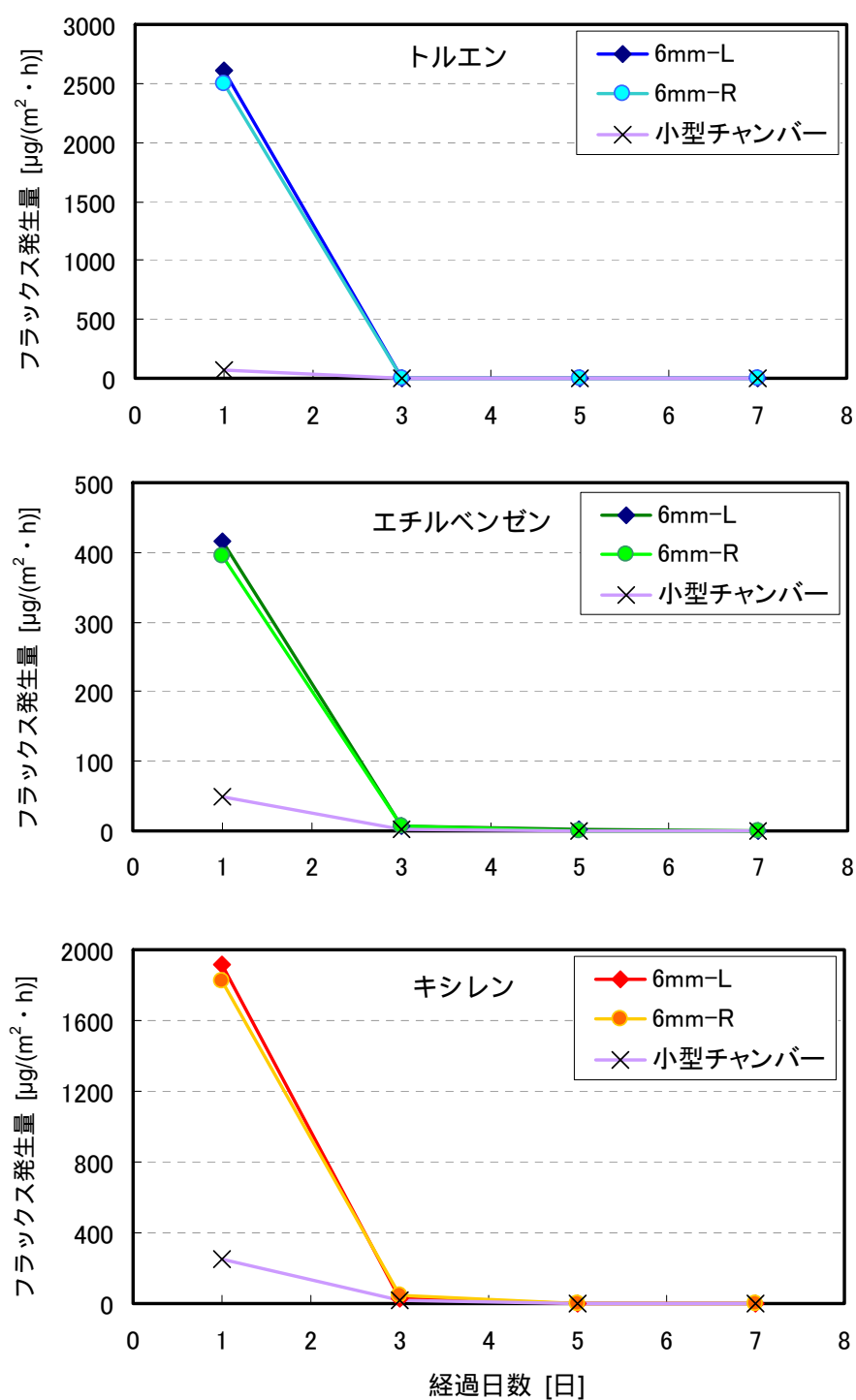
但し、小型チャンバー法による試験結果は放散速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

図 2-15 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較
(けい酸カルシウム板 12mm)



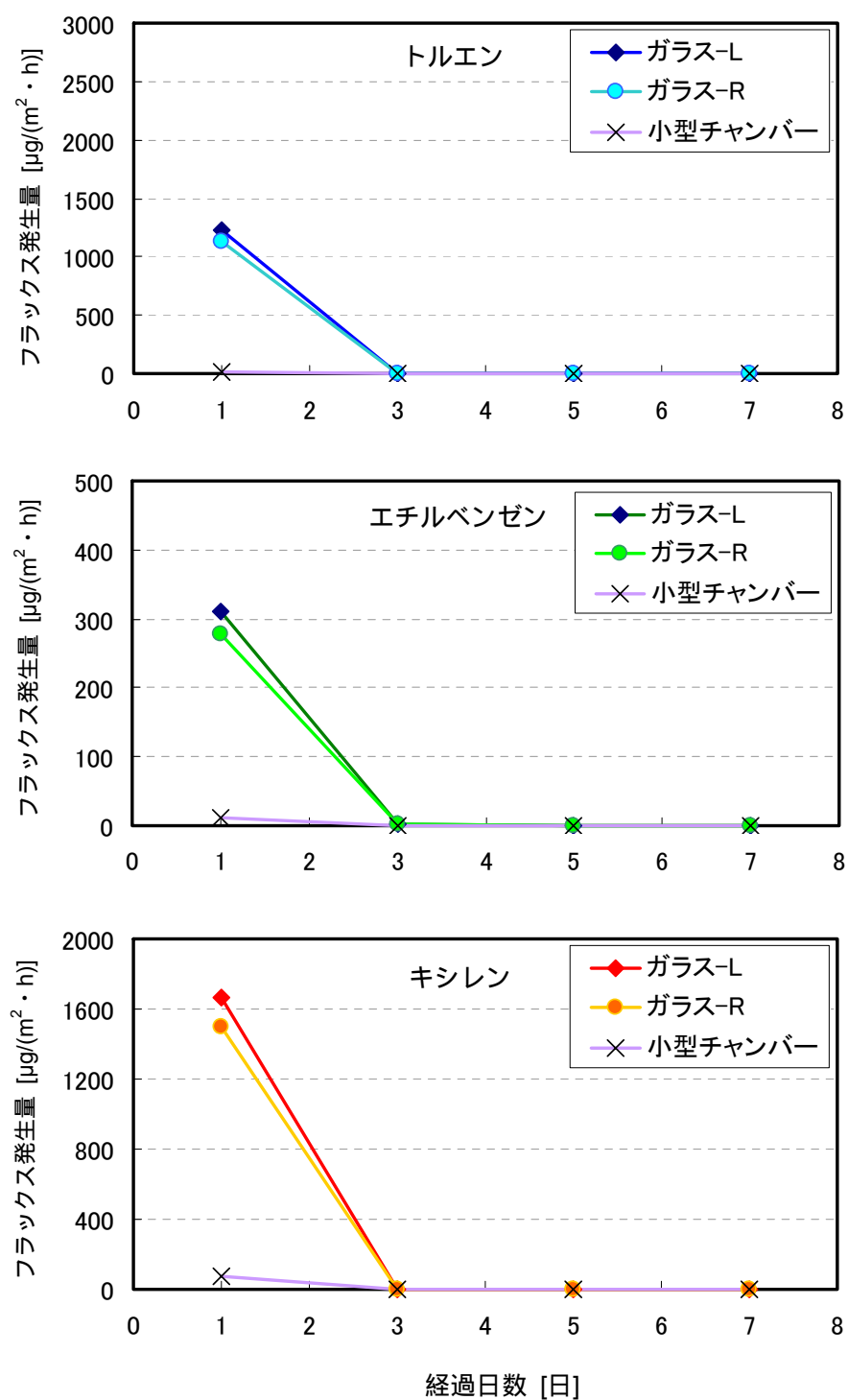
但し、小型チャンバー法による試験結果は放散速度 $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

図 2-16 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較
(けい酸カルシウム板 8mm)



但し、小型チャンバー法による試験結果は放散速度 $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

図 2-17 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較
(けい酸カルシウム板 6mm)



但し、小型チャンバー法による試験結果は放散速度 $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

図 2-18 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較
(ガラス板)

2.5 添加量変化によるフラックス発生量測定試験

2.5.1 目的

本章ではフラックス発生量測定法の液状建材試験法としてけい酸カルシウム板を基材とする方法を提案し、化学物質放散に対する基材性能と試験再現性を検討してきた。

「2.5 添加量変化によるフラックス発生量測定試験」では、けい酸カルシウム板を接着剤の塗布・放散基材とし、接着剤に含まれる化学物質の添加量とフラックス発生量との相関を調べた。けい酸カルシウム板は安定した放散性能を示した 12mm 厚のものをを用い、小型セルによるフラックス発生量試験に加え、比較試験として 20L 小型チャンバーによる放散速度試験を行った。

2.5.2 試験概要

試験条件を表 2-11 に、フラックス発生量試験の概要図を図 2-19 に、また小型チャンバー試験の概要図を図 2-20 に示す。12mm のけい酸カルシウム板に 0、0.05、0.1、1.0% Wt のトルエン、キシレンを添加した床施工用アクリルエマルジョン系接着剤²⁵⁾を塗布して試験片を作製した。

表 2-11 添加量変化試験条件

		フラックス発生量(小型セル法)	放散速度(小型チャンバー法)
養生条件	設定温度	23±2℃	
	相対湿度	成り行き	
	養生時間	60 分(試験片作製時間 10 分を含む)	
測定条件	設定温度	28±1℃	28±1℃
	相対湿度	50%±5% RH	50%±5% RH
	換気回数	-	0.5 回/h
	試料負荷率	-	2.2 m ² /m ³
各種条件	接着剤	床施工用アクリルエマルジョン系	
	添加物質	トルエン、キシレン	
	添加量	0、0.05、0.1、1.0%Wt	
	放散基材	けい酸カルシウム板(12mm)	
	塗布量	300±5g/m ²	
	測定時間	1、3、7 日目	1、3、5、7 日目
	捕集管	VOC-SD (Carboxen564)	Perkin Elmer Tube (Tenax-TA)
	分析	溶媒抽出、GC/MS	加熱脱着、GC/MS

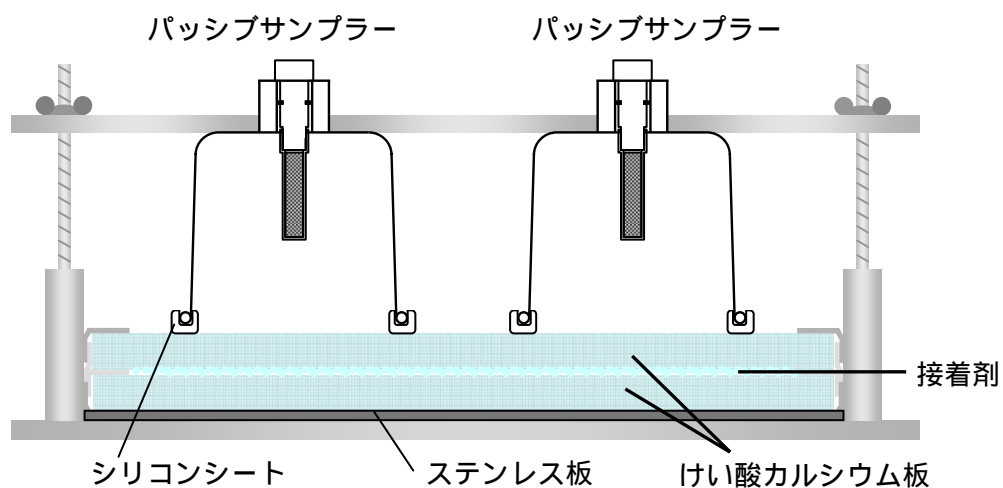


図 2-19 小型セルによるフラックス発生量試験の概要図

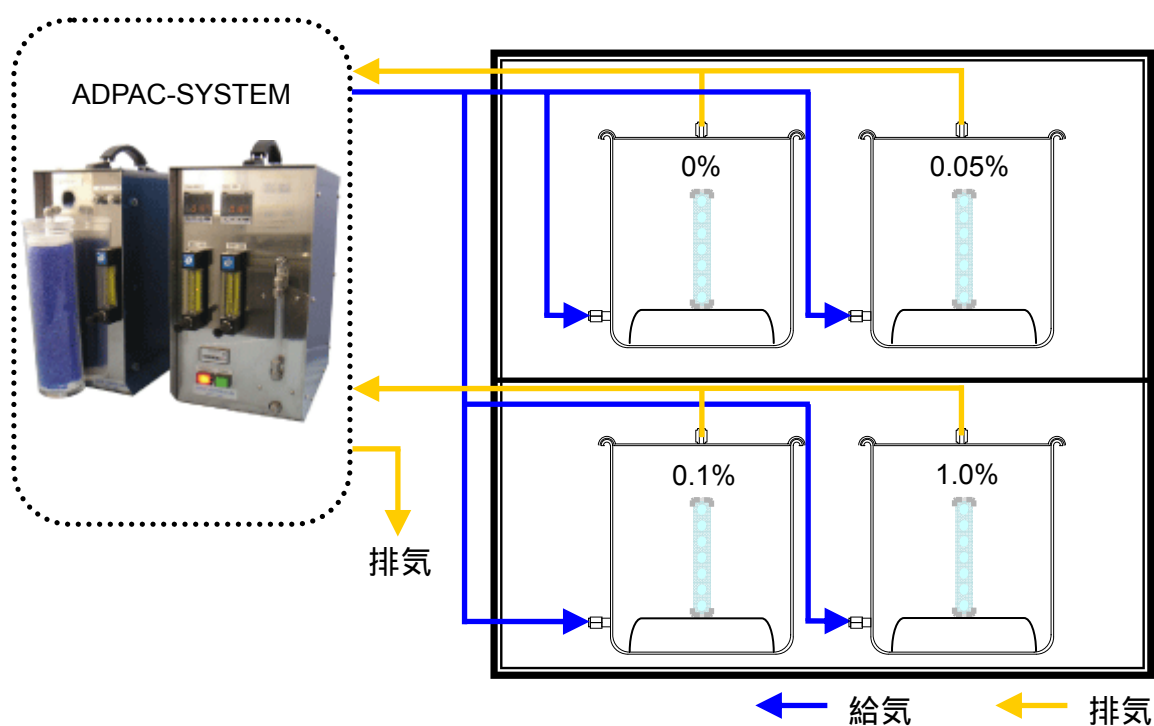


図 2-20 20L 小型チャンバーによる放散速度試験の概要図

2.5.3 試験結果

小型セルによるフラックス発生量及び小型チャンバーによる放散速度試験結果を表 2-12 に示す。
また、図 2-21 に放散速度試験結果を、図 2-22 にフラックス発生量試験結果を示す。

表 2-12 フラックス発生量と放散速度試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

	添加量	試験名	1 日目	3 日目	5 日目	7 日目
トルエン	0%	0%-L	11	3		N.D.
		0%-R	12	4		N.D.
		小型チャンバー	4	12	10	1
	0.05%	0.05%-L	1936	182		1
		0.05%-R	1983	161		2
		小型チャンバー	136	47	11	2
	0.1%	0.1%-L	3792	313		3
		0.1%-R	3454	321		3
		小型チャンバー	161	53	10	2
	1.0%	1.0%-L	35421	2864		38
		1.0%-R	39638	3201		43
		小型チャンバー	371	148	44	13
エチルベンゼン	0%	0%-L	5	2		N.D.
		0%-R	5	3		1
		小型チャンバー	3	6	5	1
	0.05%	0.05%-L	147	47		4
		0.05%-R	133	44		6
		小型チャンバー	70	31	13	4
	0.1%	0.1%-L	307	91		8
		0.1%-R	272	89		8
		小型チャンバー	94	42	16	5
	1.0%	1.0%-L	2614	827		68
		1.0%-R	2867	927		80
		小型チャンバー	310	144	66	40
キシレン	0%	0%-L	9	9		1
		0%-R	9	9		1
		小型チャンバー	6	38	32	4
	0.05%	0.05%-L	693	272		30
		0.05%-R	626	254		38
		小型チャンバー	220	133	76	28
	0.1%	0.1%-L	1432	536		56
		0.1%-R	1264	527		57
		小型チャンバー	282	168	92	38
	1.0%	1.0%-L	13494	4891		495
		1.0%-R	15181	5312		587
		小型チャンバー	674	429	244	185

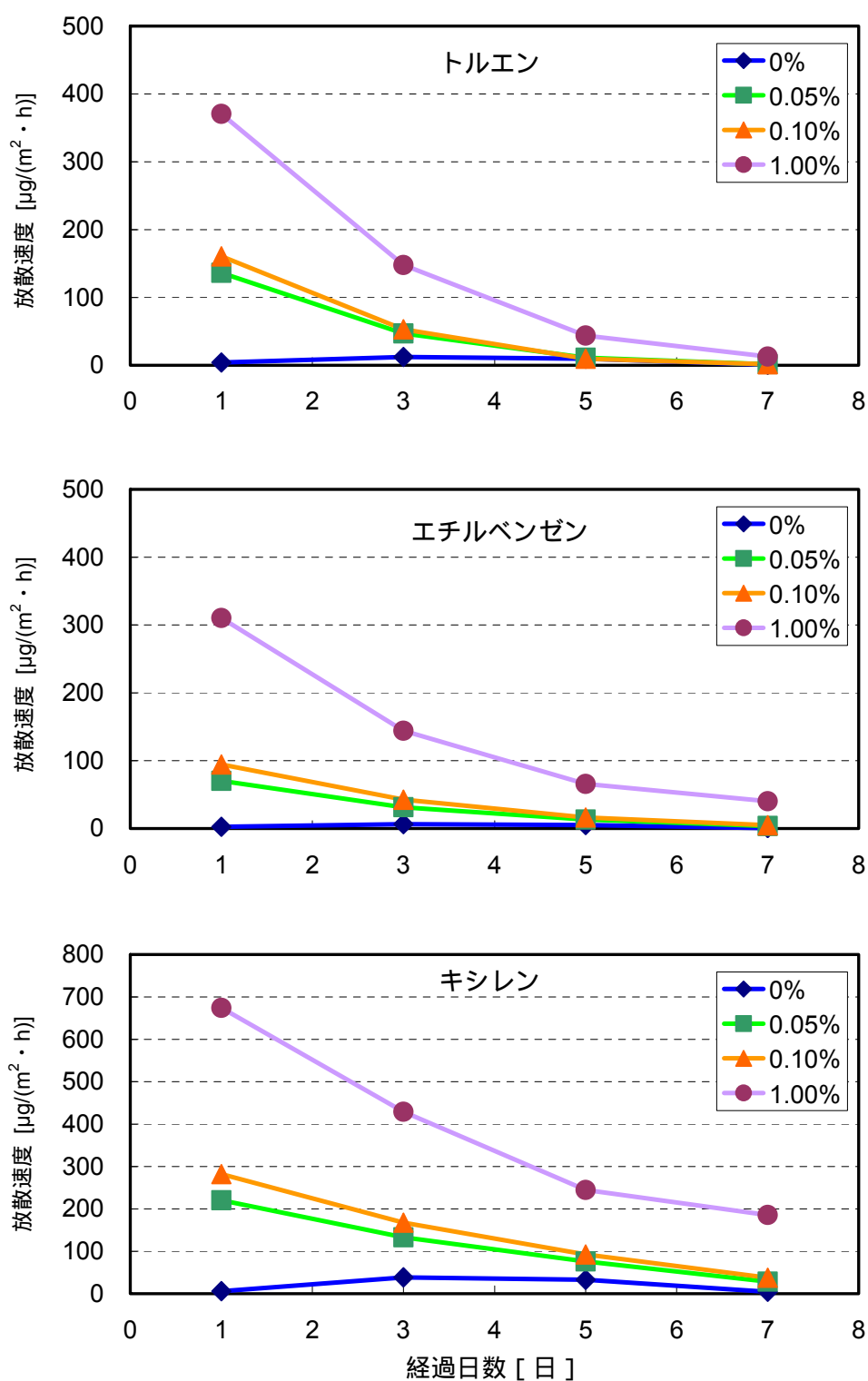


図 2-21 添加量変化試験の 20L 小型チャンバーによる放散速度試験結果

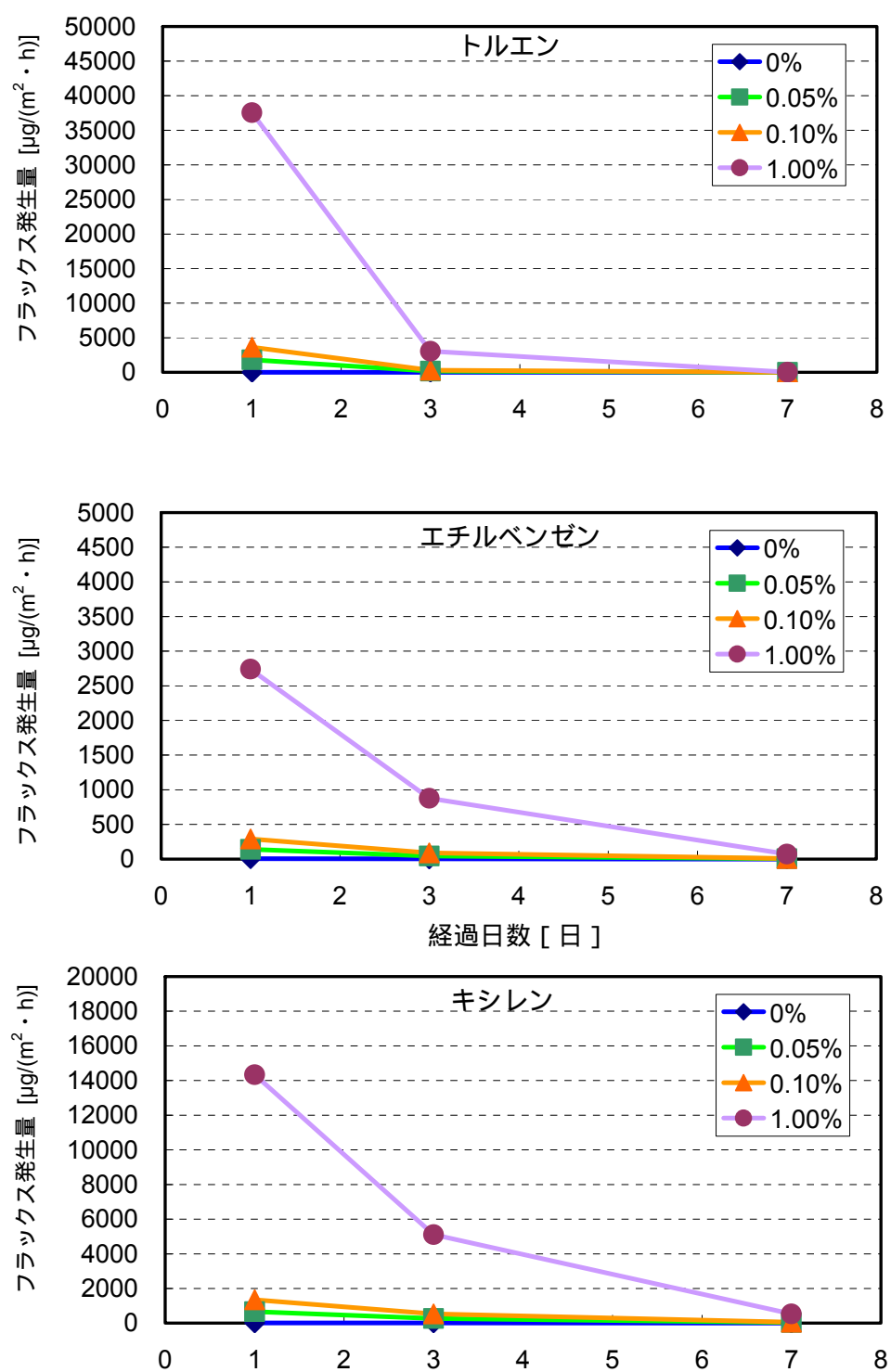


図 2-22 添加量変化試験の小型セルによるフラックス発生量試験結果

小型チャンバー法においては、すべての測定日において添加量が多いほど高い放散速度となった。

トルエン、キシレンの 0.05%、0.1% Wt 添加の試験片において 1、3 日目まで、また 1.0% 添加においてはトルエンで 5 日目、キシレンで 7 日目まで放散速度は高い水準となっていた。

キシレン、エチルベンゼンにおいてはトルエンと同様の傾向で減衰しているものの、トルエンの方が揮発性が高いため、時間経過後もトルエンに比べ高い放散速度を示している。

化学物質を添加していない 0% の接着剤においても 5 日目の結果まで放散が見られた。これは接着剤の製造時に含有される成分が検出されたものと考えられる。

フラックス測定法においても添加量が多いほど高い放散速度となった。左右 (Left / Right) のサンプラー間の差は小さく、塗りムラ等による影響は小さかった。キシレン、エチルベンゼンにおいてはトルエンと同様の傾向で減衰しているが、トルエンの方が揮発性が高いため、日数経過後もトルエンに比べ高い値を示している。今回測定した床施工用アクリルエマルジョン系の接着剤はトルエン、エチルベンゼン、キシレンが 0.05% Wt 以上含有されている場合は、試験片作製後 7 日程度で放散することが確認された。

また、エチルベンゼンとキシレンは初期放散量に比べ 7 日目における放散の減衰の程度がトルエンより小さく、試料作製から 1 週間が経っても放散し続けることが確認された。

試験結果から、小型チャンバー法では化学物質の含有量の割合と放散速度の割合が必ずしも一致しないが、フラックス発生量測定法では含有量比とフラックス発生量比がほぼ一致することが確認できた。

2.5.4 添加量と捕集量の関係

表 2-13 にフラックス発生量測定法における添加量と捕集量との相関を纏めた表を、また図 2-23 にそのグラフを示す。トルエン、エチルベンゼン、キシレン共に 1、3 日目の結果において添加量と捕集量は非常に高い相関を示した。また、添加量別の小型セルによるフラックス発生量測定試験と小型チャンバーによる放散速度試験結果を図 2-24～2-26 に示す。

小型チャンバー法はダイナミックヘッドスペース法と呼ばれる、換気を行いながら放散試験をする方法であり、物質検出量と吸引流量からチャンバー内の気中濃度を算定し、建材面積、チャンバー内換気量から放散速度を算出する方法である。一方、フラックス発生量測定法は建材から放散した物質を捕集し、その捕集量自体を建材面積で除ずるため、物質含有量の比とフラックス発生量の比が一致する。今回は床施工用アクリルエマルジョン系の接着剤のみの結果となるが、フラックス発生量から建材に含まれている化学成分の含有比を推定できることが示唆された。

表 2-13 小型セル法における添加量と捕集量の関係

	トルエン		エチルベンゼン		キシレン	
添加量	1 日目	3 日目	1 日目	3 日目	1 日目	3 日目
0%	1	0	1	0	1	1
0.05%	215	20	17	5	78	31
0.10%	430	38	34	11	160	63
1.00%	4450	360	325	104	1700	605
相関係数	0.99999	0.99997	0.99998	1.00000	0.99996	0.99999

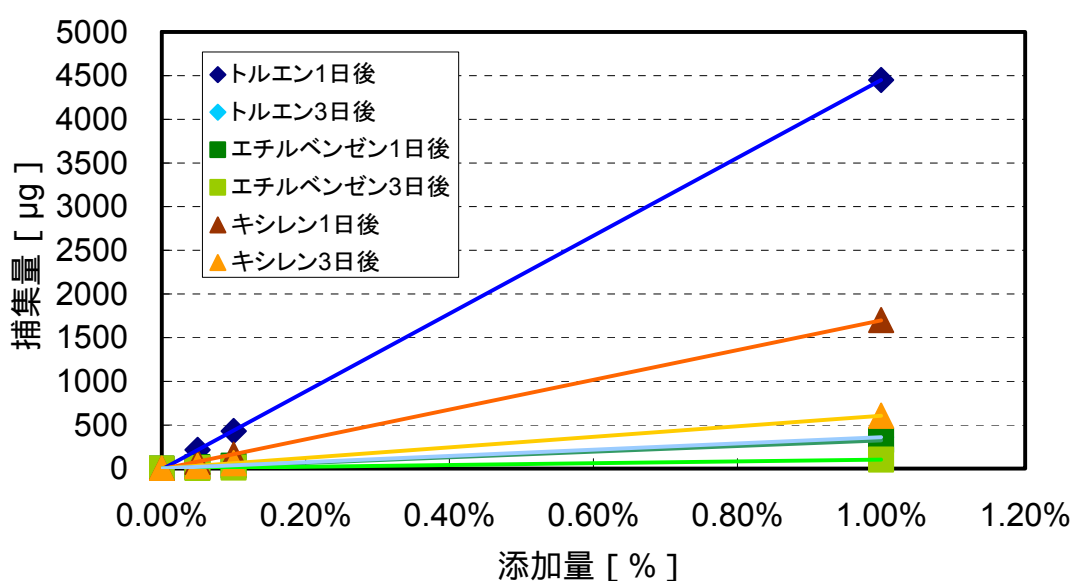


図 2-23 小型セル法における添加量と捕集量の関係

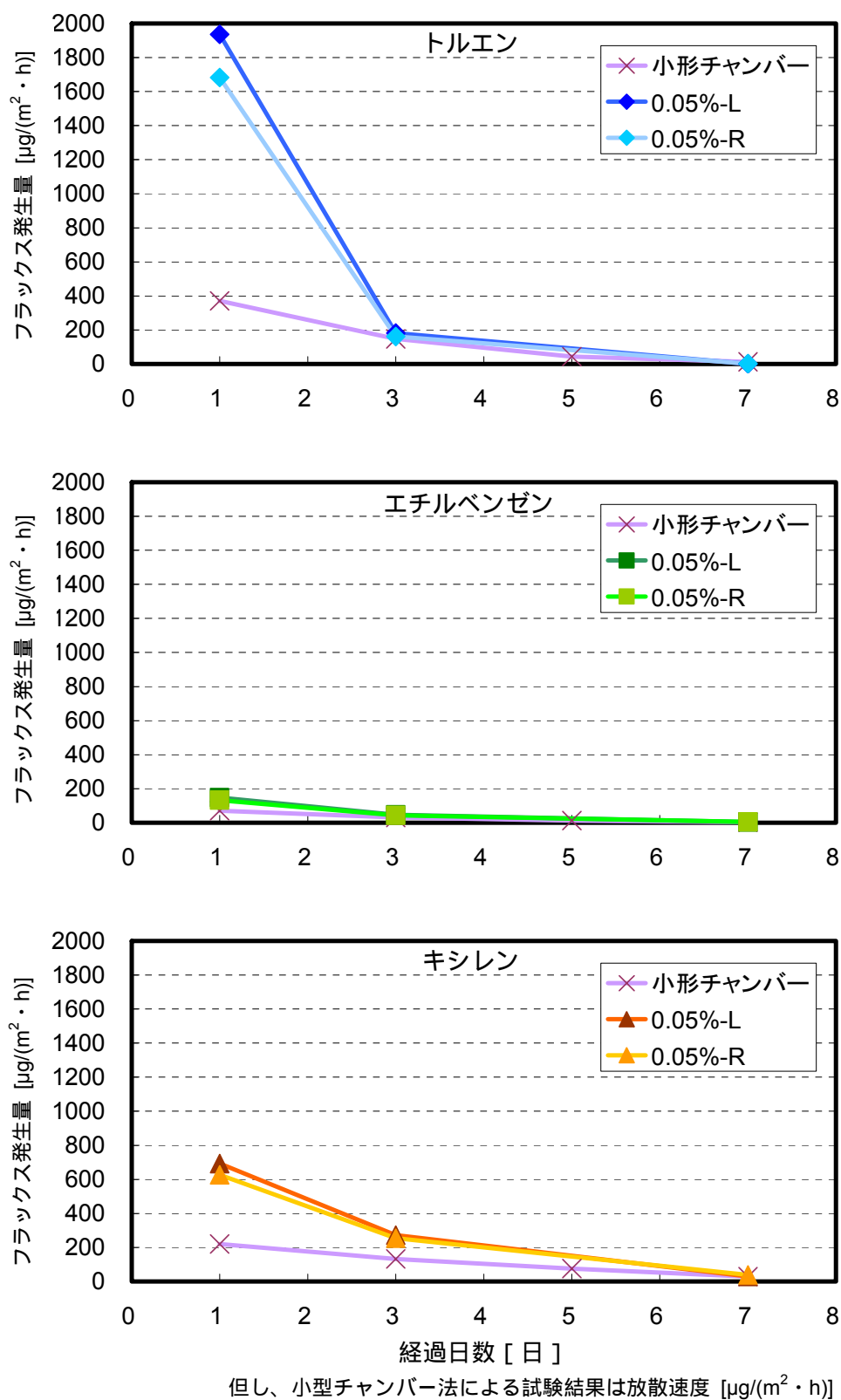
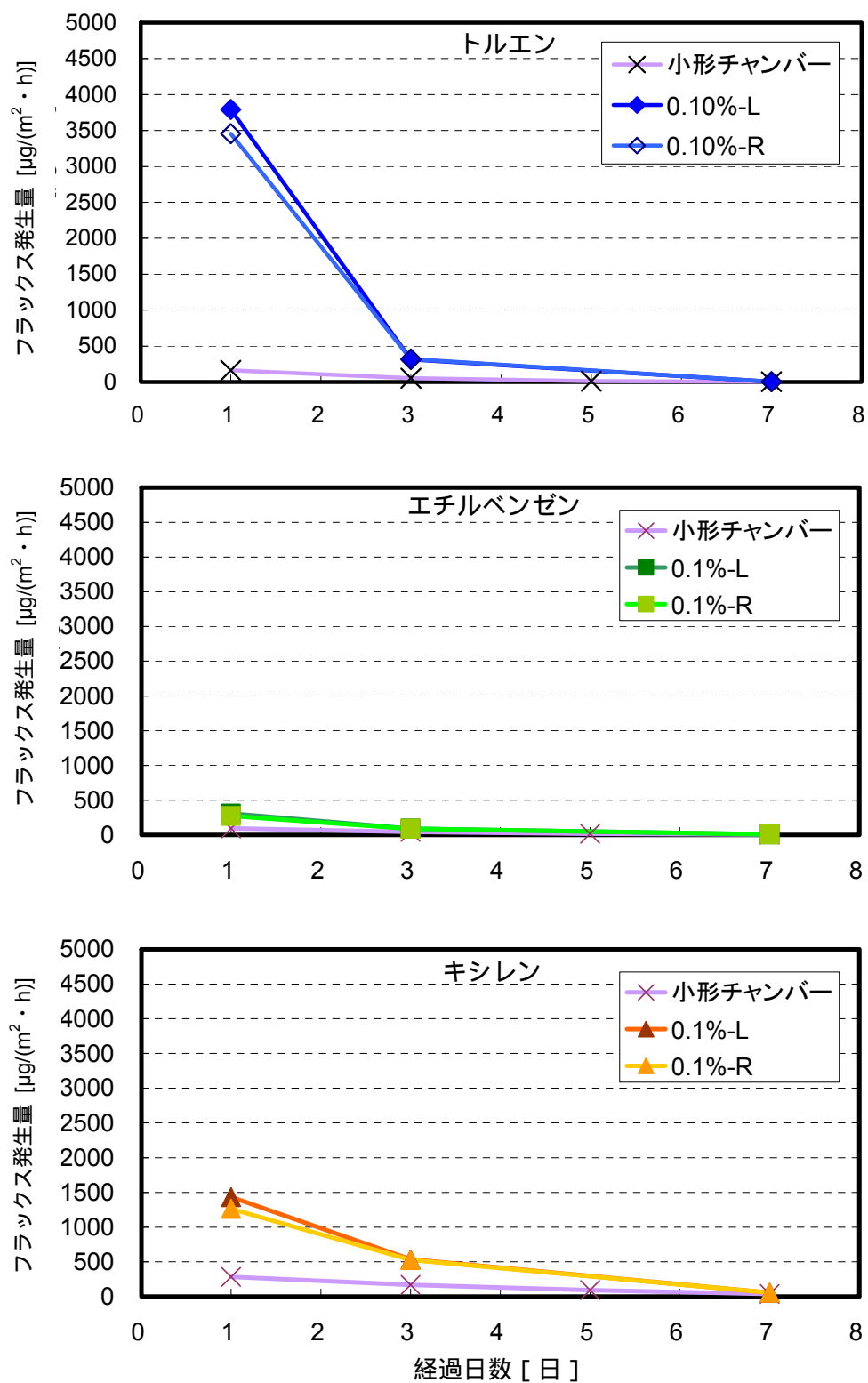


図 2-24 0.05%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較



但し、小型チャンバー法による試験結果は放散速度 $[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

図 2-25 0.1%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較

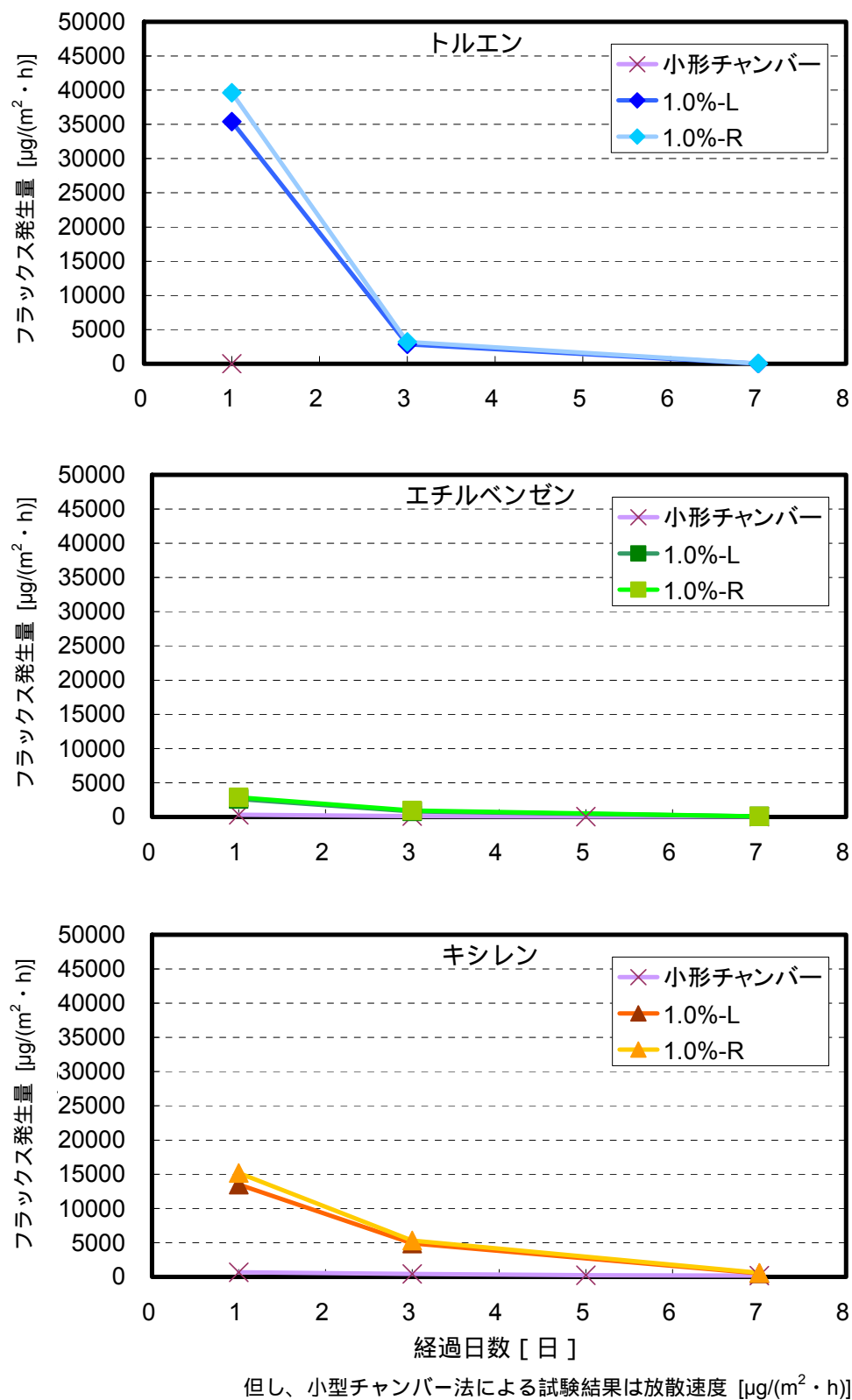


図 2-26 1.0%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較

2.6 養生条件と再現性

2.6.1 目的

これまでの試験結果からけい酸カルシウム板を放散基材とし、接着剤からのフラックス発生量の試験を精度よく行えることを確認した。

ここでは、基材の試験片作製前養生条件及び試験片作製後養生条件を変え、一定量（0.05%Wt）のトルエンとキシレンを添加し、試料の養生条件と再現性との関係を調べた。

2.6.2 試験概要

試験条件を表 2-14 に示す。試験片 A、B は試験片作製前養生条件と試験片作製後の養生条件が異なる。試料 A は養生を行わず試験片作製を行い、作製した試験片を環境制御を行わない室内で 60 分間養生したものである。試料 B は 24 時間の養生を行ってから試験片作製を行い、作製後も相対湿度 50%RH の環境制御条件で 60 分間養生を行った。

表 2-14 養生条件によるフラックス発生量比較試験条件

基材条件	試料名	A	B
	試験前養生	なし	24 時間
	n 数	1	1
養生条件	設定温度	23 ± 2 °C	
	相対湿度	成り行き	50%
	養生時間	60 分	
試験条件	設定温度	28 °C ± 1 °C	
	相対湿度	50% ± 5%RH	
各種条件	接着剤	床施工用アクリルエマルジョン系	
	添加物質	トルエン、キシレン	
	添加量	0.05 % Wt	
	基材	けい酸カルシウム板 (12mm)	
	塗布量	300 ± 5g/m ²	
	測定時間	1、3、7 日目	
	捕集管	VOC-SD (Carboxen564)	
	分析	溶媒抽出、GC/MS	

2.6.3 試験結果

試験結果及び標準偏差を表 2-15 に、また図 2-27 に物質別の比較グラフを示す。各試験片における測定日別のダブルサンプリング結果 (Left / Right) は等しい値を示し、試験日に関係なく再現性高い試験ができることが確認された。

また、試験片作製前養生、作製後養生時の条件が異なる試料 A と試料 B において、トルエンの 1 日目の結果で 21%、3 日目の結果では 30% の差が見られた。

エチルベンゼンは 1 日目 5%、3 日目 3% の差が生じ、キシレンは 1 日目・3 日目共に 13% の差が見られた。

トルエンにおいて特に差が見られたのは他の物質に比べ揮発性が高く、放散量も多いことから基材の含水率など養生条件に大きく影響されたためと考えられる。

結果として、養生条件が異なる場合、トルエンにおいて最大 30% 程度の誤差が、エチルベンゼンとキシレンに関しては 10% 程度の誤差が生じたため、より厳密な試験結果を得るためには同一条件で熱処理を行い、含水率条件を一定にした上で試験を行うことが必要であることが分かった。

表 2-15 養生条件による比較試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

物質名	試験名	1 日目	3 日目	7 日目
トルエン	A-L	1936	182	1
	A-R	1983	161	2
	B-L	1674	131	0
	B-R	1407	107	0
	標準偏差	266	33	1
エチル ベンゼン	A-L	147	47	4
	A-R	133	44	6
	B-L	146	48	4
	B-R	120	40	3
	標準偏差	13	3	1
キシレン	A-L	693	272	30
	A-R	626	254	38
	B-L	625	249	21
	B-R	521	206	16
	標準偏差	71	28	10

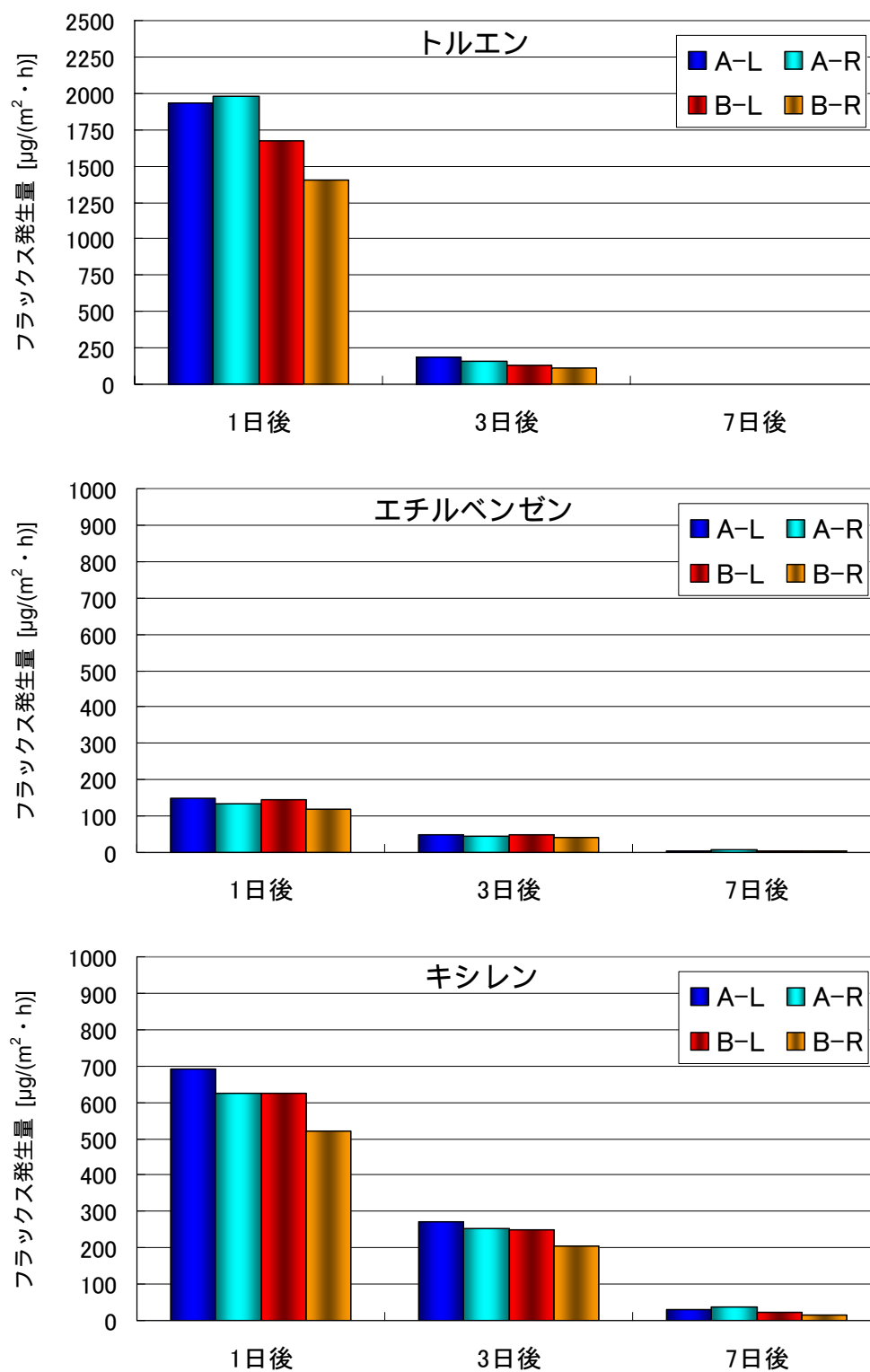


図 2-27 養生条件によるフラックス発生量比較試験結果

2.7 まとめ

建材や家具などから放散される化学物質の放散量を、精度を確保しながら簡便に測定できるフラックス発生量測定器具としてステンレス（SUS304）製の台形状小型セルを開発し、試験性能の検証を行った。

合板、MDF、ボード類などの固体状の建材に対する放散試験性能の比較のために EPS を用いたフラックス発生量測定法と小型チャンバー法との比較試験を行った。

更に、接着剤、塗料、防水材など液状建材に対する放散試験のための新しい試験片として、けい酸カルシウム板を用いた試験片と試験法を提案し、再現性試験・精度試験・物質含有量変化試験・養生条件変化試験の検証試験を行った。

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 3 種類の EPS を用いた試験では、各物質に関する測定結果は同一建材からサンプリングしたサンプラー4 本共に同等な値を示し、偏差が少なく再現性よく試験を行うことができた。1 日目のフラックス発生量は、小型チャンバー法の放散速度測定値より高くなり、1 日目は安全側の測定ができることが確認された。

小型セルによるフラックス発生量は時間経過と共に下がり、3 日目は小型チャンバー法による放散速度より若干低く、7 日目には小型チャンバー法と同等な結果が得られた。また、3 日目以降はチャンバー法の結果値と類似した結果が得られるため、チャンバー試験が行えない現場や、チャンバー試験装置のない研究所などではチャンバー試験の代わりに使用できると考えられる。

- 2) 液状建材からのフラックス発生量測定法としてけい酸カルシウム板を試験片基材に用いる方法を提案し、基材の放散性状とけい酸カルシウム板を用いたフラックス発生量測定法の性能試験を行った。

小型セル法においてダブルサンプリングした左右のサンプラー間の差は小さく、塗りムラ等による影響は小さかった。1 日目の結果でトルエンにおいては 8mm が、キシレン、エチルベンゼンにおいては 6mm が最も高い値を示した。3 日目以降は基材厚が厚いほど高いフラックス発生量となっており、基材が厚いほど化学物質は時間をかけて放散することが確認された。ガラス板に接着剤を塗布した試験片は、初期放散が早く、1 日目に既に多くの物質が放散されてしまったため、1 日目以降は放散が殆ど見られなかった。

12mm 厚の試験片は 1、3、5 日目の結果において小型セル法が小型チャンバー法結果を下回ることはなく、安全側の測定ができることが確認された。

以上の結果から、接着剤からの放散量測定には、けい酸カルシウム板を用いた試験片を使用することで試験結果の信頼性及び再現性を高め、フラックス発生量測定法を用いて簡便かつ容易に建材からの放散量測定が可能であった。

- 3) 添加量によるフラックス発生量測定法の性能試験では、キシレン、エチルベンゼンにおいてはトルエンと同様の傾向で減衰しているものの、トルエンの方が揮発性が高いため時間経過後もトルエンに比べ高い放散量を示した。フラックス発生量においては添加量が多いほど高い放散となり、ダブルサンプリングによる左右 (Left / Right) のサンプラー間の差は小さく、塗りムラ等による影響は小さかった。

また、エチルベンゼンとキシレンは初期放散量に比べ7日目における放散の減衰の程度がトルエンより小さく、試料作製から1週間が経過しても放散し続けることが確認された。

小型チャンバー法では含有量の割合と放散速度の割合が必ずしも一致しないが、小型セルによるフラックス発生量測定法では含有量比とフラックス発生量比がよく一致していることが確認できた。フラックス発生量から建材に含まれている化学成分の含有量を推察できることが示唆された。

- 4) 試験片作製前の基材養生条件及び試験片作製後の養生条件が異なる試料Aと試料Bにおいて、トルエンでは最大30%程度の誤差が、エチルベンゼンとキシレンに関しては10%程度の誤差が生じた。トルエンにおいて特に差が見られたのは他の物質に比べ揮発性が高く、放散量も多いことから基材の含水率など養生条件が大きく影響したと考えられる。

そのため、厳密な試験結果を得るためには同一条件で熱処理を行い、含水率条件を一定にした上で試験を行う必要があることが分かった。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：改正建築基準法に基づくシックハウス対策コーナー、
<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/sickhouse.html>
- 2) 国土交通省住宅建築指導課：シックハウス対策マニュアル編集委員会他：建築物のシックハウス対策マニュアル、2003
- 3) 日本規格協会：建築材料の揮発性有機化合物（VOC）、ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散測定方法－小形チャンバー法、JIS A 1901、2003
- 4) 村上周三、田辺新一：JIS 使い方シリーズ シックハウス対策に役立つ小形チャンバー法解説 [JIS A 1901]、日本規格協会、2003
- 5) 日本規格協会：建築材料などからのホルムアルデヒド放散測定方法－大形チャンバー法、JIS A 1911、2006
- 6) 日本規格協会、建築材料などからの揮発性有機化合物（VOC）、及びホルムアルデヒドを除く他のカルボニル化合物放散測定方法－大形チャンバー法、JIS A 1912、2008
- 7) ISO, ISO 16000-9 : Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing - Emission test chamber method, 2006
- 8) 日本規格協会：建築用ボード類のホルムアルデヒド放散量の試験方法－デシケーター法、JIS A 1460、2001
- 9) P. Wolkoff, P.A.Clausen, P.Anielsen, H.Gustafsson, B.Jonsson, E.Rasmusen : Field and Laboratory Emission Cell : FLEC・IAQ 91 Healthy Buildings, pp.160-165, 1991
- 10) 日本規格協会：建築材料の揮発性有機化合物（VOC）のフラックス発生量測定法－パッシブ法、JIS A 1903、2008
- 11) 熊谷一清、藤井実、篠原直秀、義之信司、柳澤幸雄：パッシブ型放散量測定装置の開発 その1 加熱脱着法を用いた VOCs フラックスの測定、日本建築学会大会梗概集、pp.1009-1010、2002
- 12) 塚原弘泰、堀雅宏、岩田利枝：トリエタノールアミン濾紙を用いた簡易測定法による住宅内のホルムアルデヒド汚染に関する実測研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.749-750、2000
- 13) 村江行忠：内装建材からの化学物質放散量の測定方法と簡易測定法の提案、建築仕上技術 vol.29、pp.52-55、2004
- 14) 青木龍介、松本仁、阿久津太一、熊谷一清、田辺新一：建材から発生するアルデヒド類のパッシブ測定法（ADSEC）の開発 その4 ADSEC と FLEC、ADPAC との比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.853-854、2001
- 15) 窪田圭佑、金勲、田淵誠一、石川祐子、長谷川あゆみ、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その17 化学物質放散量簡易測定法の開発、日本建築学会大会、2005
- 16) 窪田圭佑、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その14 接着剤からの揮発性有機化合物放散量の測定法の開発、空気調和・衛生工学会学術講演会、2006
- 17) 田中祐輔、窪田圭佑、常本祥子、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 そ

の31 接着剤からの VOC フラックス発生量測定法の開発、日本建築学会大会、2007

- 18) 仲村寿人、金勲、田辺新一、井上雅雄、澤田幸三：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価（その18）けい酸カルシウム板を用いた接着剤からの VOCs 放散量測定、空気調和・衛生工学会学術講演会、2008
- 19) スペルコ事業部：室内大気パッシブサンプラー、VOCs 捕集用（溶媒抽出タイプ）高性能パッシブサンプラーVOC-SD、取扱説明書、シグマアルドリッチジャパン株式会社
- 20) 長谷川あゆみ、竹田菊男：固体吸着－溶媒脱着法による室内空気中のスチレン分析における回収率補正法の検討、日本建築学会学術大会、2007
- 21) 佛願道男、井上嘉則、青山哲也、細川利昭、関根嘉香：VOCs 用高感度パッシブ型捕集管、日立化成テクニカルレポート NO.41、2003
- 22) 森田昌敏他：有害大気汚染物質測定の実際、社団法人日本環境衛生センター、1997
- 23) 日本規格協会：建築材料の揮発性有機化合物（VOC）、ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散量測定におけるサンプル採取、試験片作製及び試験条件、JIS A 1902、2006
- 24) 日本規格協会：繊維強化セメント板、JIS A 5430、1995
- 25) 日本接着剤工業会：接着剤読本、日本接着剤工業会、pp.32-58、2002

第 3 章

PFT 換気量測定法

第3章 PFT 換気量測定法

3.1 背景と目的

本研究における PFT 法（Perfluorocarbon Tracergas Technique）¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は簡易一定発生法—濃度平均法⁵⁾であり、トレーサーガスとして PFCs（Perfluorocarbons）を用いるパッシブ手法の換気量測定法である。

一般的に換気量測定法としてはトレーサーガス法、風量測定法、差圧測定法などが用いられる⁵⁾⁶⁾。

風量測定法は給排気口における風量を直接測定し、換気量を推定する方法であるが、給排気口のみデータであり、隙間からの換気や温度差換気は評価できない。また、常時変動する圧力変化に対応し難い問題点もある。

差圧測定法は流量係数や風圧係数など住宅の開口特性が分かれば、室内外の差圧を測定することで換気量の算定ができる。但し、算定式に必要な住宅固有の係数を求めるのが難しく、不特定多数の一般住宅に適用するには誤差が大きくなる短所がある。

実際の換気量を把握するためによく用いられる測定法はトレーサーガス法である。トレーサーガス法は対象ガス（Tracergas）を空間にドージングしながら気中濃度を計測し、ドージング量と気中濃度から換気量を算定する方法である。このように、制御及び計測に機器を用いるアクティブ換気量測定法は実時間測定と短周期測定ができるため、測定期間中の時間平均換気量だけでなく、瞬時的な換気性状の変化も把握できる長所がある。

アクティブ法を用いる換気量測定法では以下のような機器が必要とされる。

- ・トレーサーガスの気中濃度測定：吸引装置、分析装置、チューブなど
- ・トレーサーガス発生装置：ガスボンベ、ガス流量制御装置、チューブ、ドージングポンプ、チューブなど
- ・制御装置：制御用 PC

上記装置は高価で、装置が大掛かりであるため人力を必要とする。更に、操作に専門知識が必要であり、維持管理にも手間と費用がかかる。そのため、多数の現場や住宅の実状を測定するには負担や制約が多い。

現場や住宅における換気実態を把握するためにはより多くの測定例が必要であり、そのため測定を簡便かつ安価に行える方法が望まれている。

そのため、本論文ではパッシブ手法を用いて換気量測定ができる、PFT 法を用いた換気量測定法に関する研究を行った。PFT 法は大型の機器や装置等が不要で人間の活動に支障を来さずに、数時間から数週間の期間中平均換気量測定が可能である方法とされている。

本章では、PFT 法の基本となる PFT 放散源の開発及びトレーサーガスの温度依存性実験、PFCs3 物質に対するパッシブサンプラーのサンプリングレート（Sampling Rate：相当吸引速度）算出実験結果についてまとめた。

更に、これまでの算出式として使っていた確定的方法に誤差評価を加えた統計的方法を用いる手法について述べた。

3.2 本研究における PFT 換気量測定法の概要

PFT 法は連続発生法（簡易一定発生法、濃度平均法）に属する。PFCs（Perfluorocarbons：過フッ化炭素類）をトレーサーガスとして用い、発生量及び気中濃度の測定から換気量を求める。PFCs が入ったバイアル瓶を放散源として一定放散させ、パッシブサンプラーで捕集を行う⁷⁾。実測時に PFT 気中濃度となるべく定常状態に近づくようにするため、測定前日に放散源を設置する。翌日に捕集用サンプラーを設置、24 時間捕集を行う。

PFT 法は現場測定において器具や装置等が不要で、住人の在室状態でも日常生活や睡眠等に支障をもたらさず数時間から数日間以上の平均換気量測定が可能である。更にトレーサーガスとして使用する PFCs の種類を増やせば同時に多数室における換気量と空間空気交換量を求めることが出来る⁸⁾。

他のパッシブ手法の PFT 法が数日から数週間のサンプリング期間を設けることに對し、化学物質分析精度を上げることにより 1 日程度でも測定が可能であることが特徴である。

気中濃度及び平均換気量の算出式は式 (3-1) 及び式 (3-2) のようになる。ここで、気中濃度を求めるためにはサンプリングレート（Sampling Rate；相当吸引速度）と呼ばれる係数が必要となる^{9) 10)}。これは、物質毎に異なる値を持ち、分子量からもとめる推定式が存在するが、あくまでも推定値であるため正確なサンプリングレートを求めるためには算出実験が必要である。本研究で用いるパッシブサンプラーの PFCs 3 物質に関するサンプリングレートは本章「3.5 サンプリングレート実験」にて算出された。

$$\bar{C} = \frac{M_a - M_{TB}}{K \times t} \times 10^6 \quad \dots\dots (3-1)$$

\bar{C} : 測定期間中の時間平均気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

M_a : 測定用サンプラーの捕集総重量 [μg]

M_{TB} : トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]

K : 相当吸引速度 (Sampling Rate) [ml/min]

t : 捕集時間 [min]

$$\bar{Q} = \frac{\bar{m}}{\bar{C}} \quad \dots\dots (3-2)$$

\bar{Q} : 時間平均換気量 [m^3/h]

\bar{m} : 時間平均トレーサーガス発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]

また、サンプリングレートの温度補正はシャルルの法則に従った式 (3-3) を用いる。

$$K_{\theta} = K_{25} \times \frac{(273 + \theta)}{298} \quad \dots\dots (3-3)$$

K_{θ} : θ におけるサンプリングレート [ml/min]

K_{25} : 25 におけるサンプリングレート [ml/min]

PFT 法はドージング、サンプリング共にパッシブ手法で行うため、算出できるのは測定期間の平均換気量になる。複数の物質を用いて放散量及び気中濃度から室間空気交換量と外気導入量を算出するためには連立方程式を用いる。本章の「3.6 誤差評価手法を用いた換気量算出法の検討」にて連立方程式を解く際、換気に関する現実的な仮定を拘束条件とした最小二乗法^{11) 12) 13) 14)}を取り入れた誤差評価法について説明する。

3.3 PFT 放散源の開発及び放散量の温度依存性実験

PFT 放散源として、液体の PFCs を充填したクリンプバイアルをコンテナナーとして、シリコン膜を放散膜として使用した放散源を作製する。本研究で用いている PFT 放散源の概要を図 3-1 に示す。

C_6F_6 は放散量が多いため 1.0mm シリコン膜の上下に直径 3.0mm の穴を開けたアルミ板を置いたものと、5.0mm 厚のシリコン膜を用いて放散量を少なくした。

C_7F_8 及び C_7F_{14} は基本的に 1.0mm 厚のシリコン膜を用いるが、更に放散量を調整する必要がある場合は直径 3.0mm の穴を開けたアルミ板をシリコン膜の上下に置いた放散源を用いる。

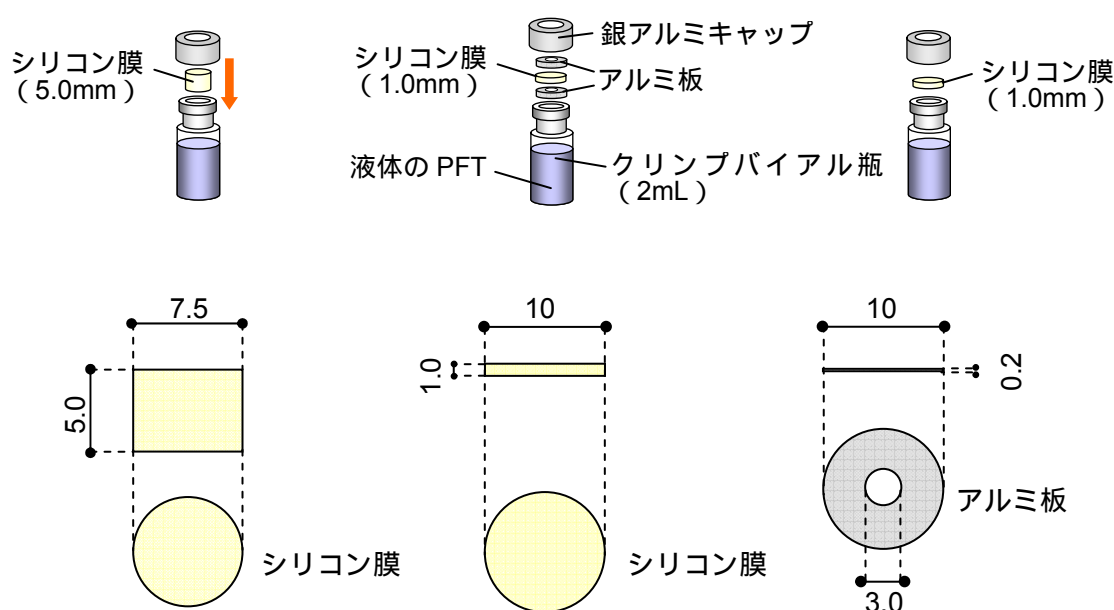


図 3-1 PFT 放散源

化学物質の放散量は温度に影響を受けるため、現場測定を行う際には温度による補正を行う必要がある。そのため、PFCs3 物質に対する温度依存性実験を行った。実験条件を表 3-1 に、

表 3-1 PFT 放散源の温度依存性実験条件

実験チャンバー	20L 小形チャンバー ADPAC
設定温湿度	10, 15, 20, 25, 30, 35 [°C] 50%RH
設定換気回数	0.5 [回/h] (20L チャンバー内で流量 167ml/min に設定)
放散量の計量	電子天秤 AandD 社製 GR-300
トレーサーガス	C_6F_6 , C_7F_8 , C_7F_{14}
シリコン膜厚さ	0.5, 1.0, 1.5, 2.0 [mm]
放散源	クリンプバイアル瓶：36 本 (厚さ 4 条件 × 3 本 × PFT3 種類)
測定時間	0, 4, 8, 20, 24 時間後に計量

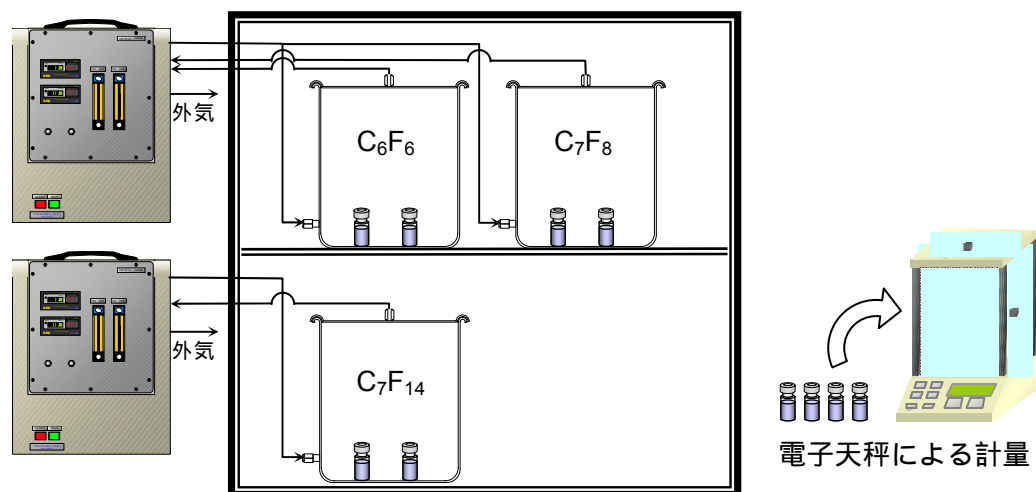


図 3-2 PFT 放散源の温度依存性実験概要図

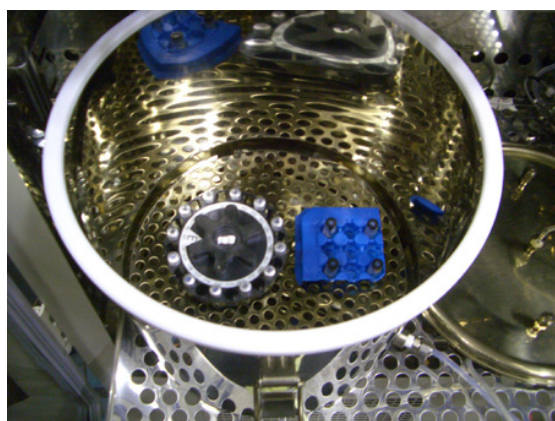


図 3-3 実験風景

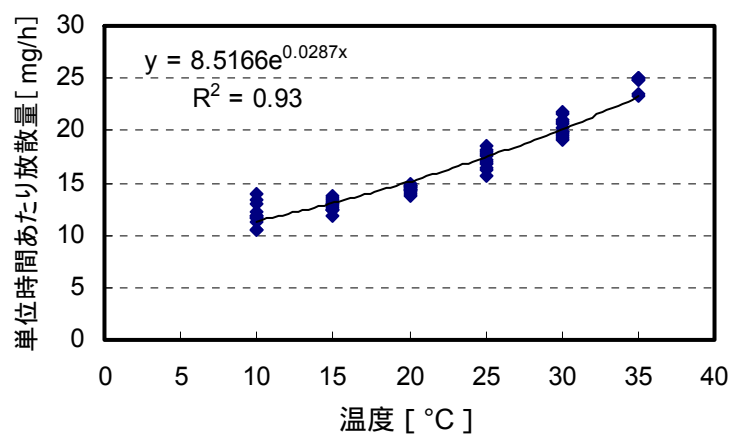


図 3-4 C_6F_6 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 0.5mm)

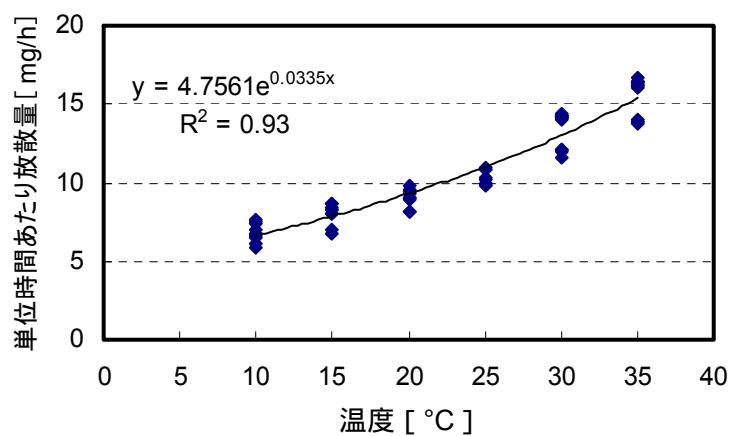


図 3-5 C_6F_6 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.0mm)

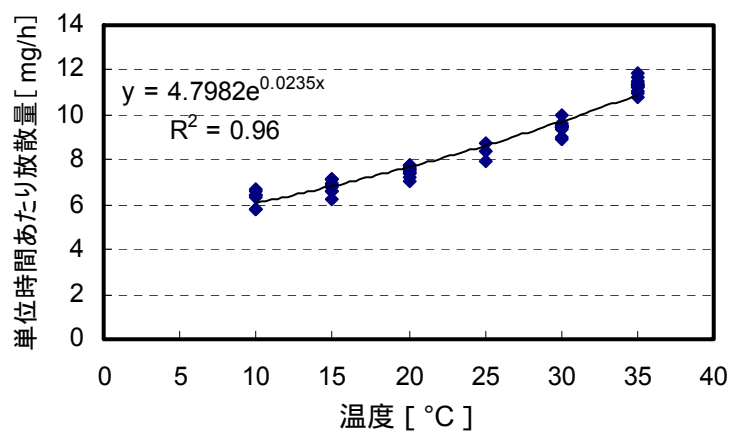


図 3-6 C_6F_6 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.5mm)

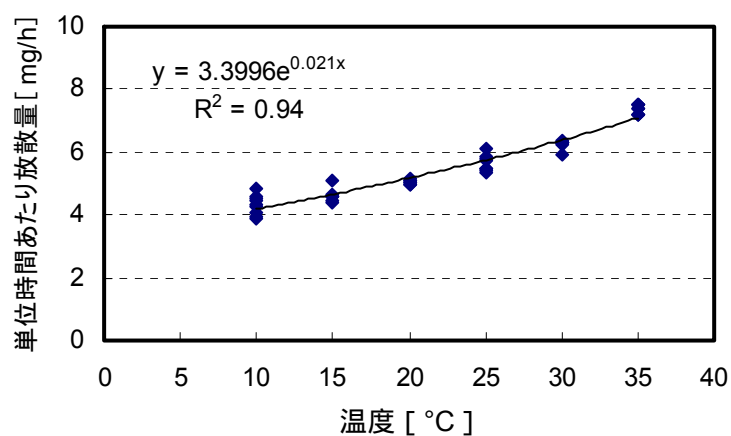


図 3-7 C_6F_6 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 2.0mm)

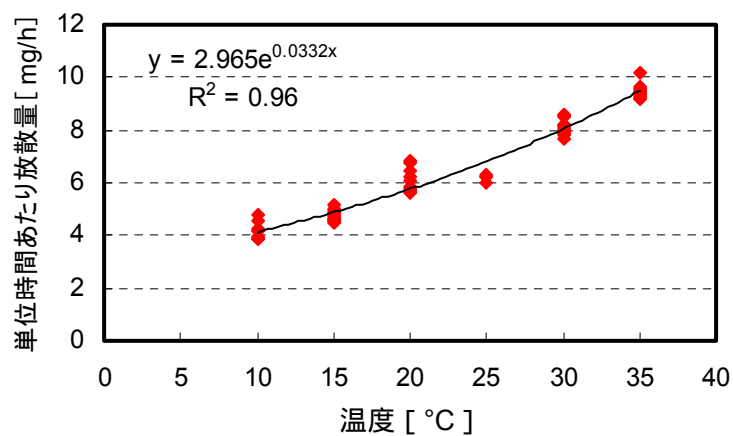


図 3-8 C_7F_8 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 0.5mm)

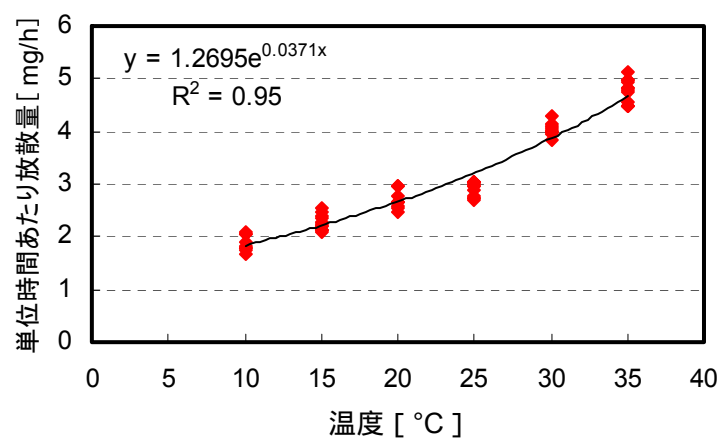


図 3-9 C_7F_8 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.0mm)

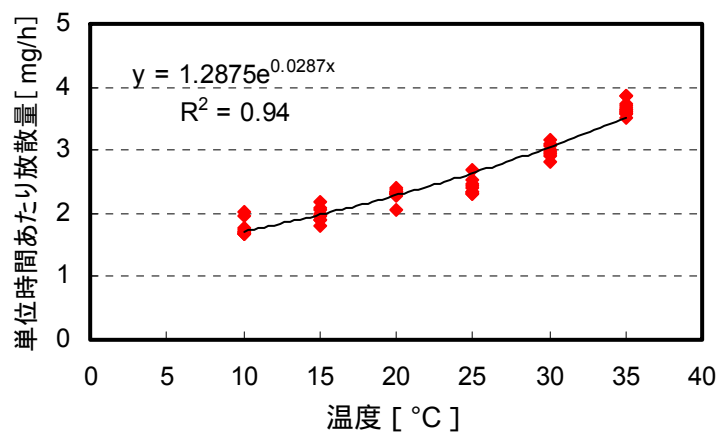


図 3-10 C_7F_8 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.5mm)

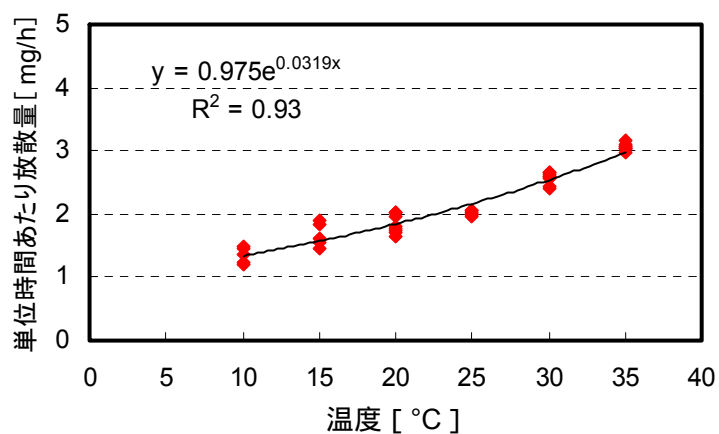


図 3-11 C_7F_8 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 2.0mm)

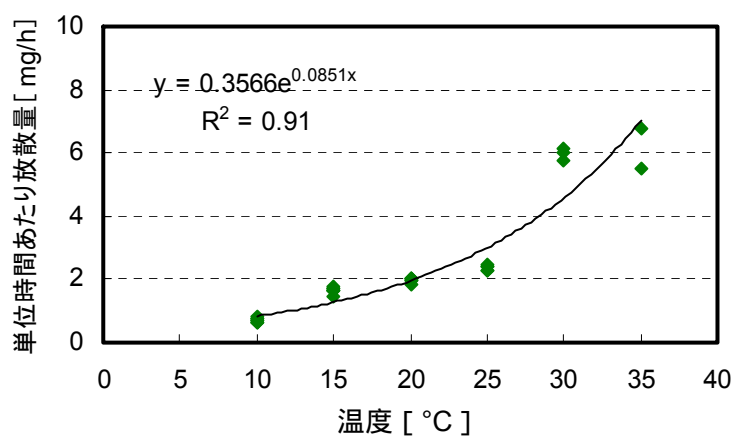


図 3-12 C_7F_{14} 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 0.5mm)

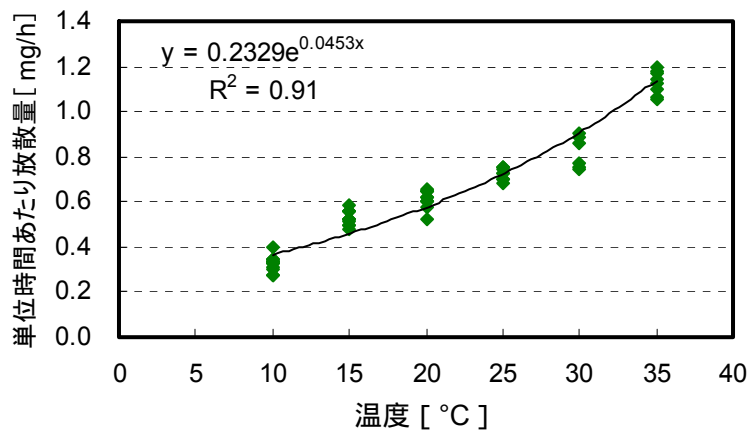


図 3-13 C_7F_{14} 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.0mm)

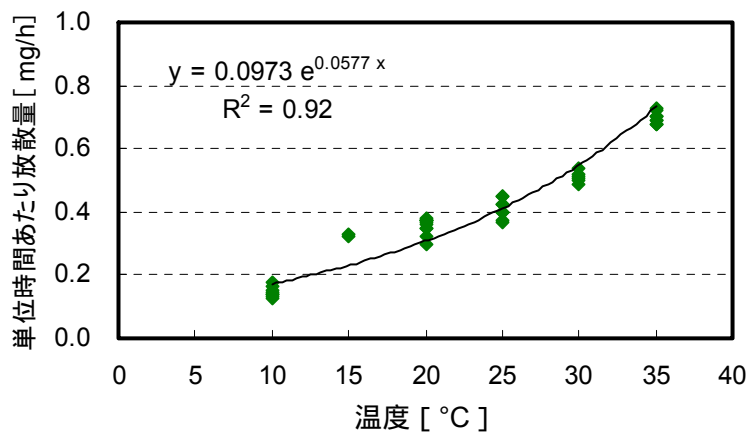


図 3-14 C_7F_{14} 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 1.5mm)

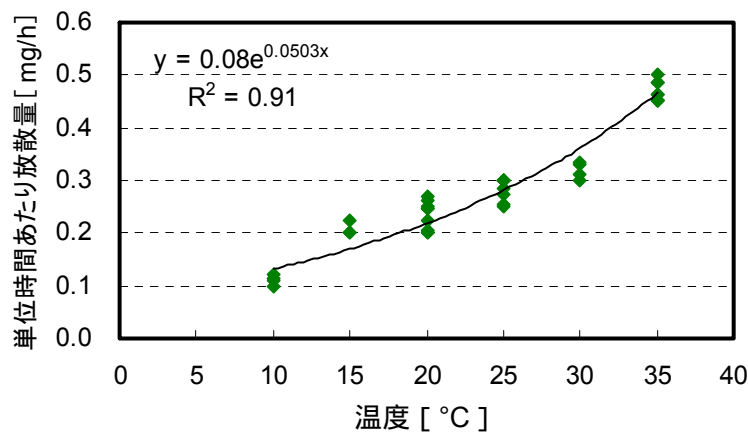


図 3-15 C_7F_{14} 単位時間あたり放散量と温度との関係 (シリコン膜厚さ 2.0mm)

図 3-4～3-15 に示した温度変化による放散量変化のグラフより、 C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} の各 PFT における温度による放散量換算式を算出した。算出した各式を以下に示す。



- ・シリコン膜厚さ：0.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.03^{(\theta-25)} \quad \dots (3-4)$$

- ・シリコン膜厚さ：1.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.03^{(\theta-25)} \quad \dots (3-5)$$

- ・シリコン膜厚さ：1.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.02^{(\theta-25)} \quad \dots (3-6)$$

- ・シリコン膜厚さ：2.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.02^{(\theta-25)} \quad \dots (3-7)$$



- ・シリコン膜厚さ：0.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.03^{(\theta-25)} \quad \dots (3-8)$$

- ・シリコン膜厚さ：1.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.04^{(\theta-25)} \quad \dots (3-9)$$

- ・シリコン膜厚さ：1.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.03^{(\theta-25)} \quad \dots (3-10)$$

- ・シリコン膜厚さ：2.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.03^{(\theta-25)} \quad \dots (3-11)$$



- ・シリコン膜厚さ：0.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.09^{(\theta-25)} \quad \dots (3-12)$$

- ・シリコン膜厚さ：1.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.05^{(\theta-25)} \quad \dots (3-13)$$

・シリコン膜厚さ：1.5mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.06^{(\theta-25)} \quad \dots (3-14)$$

・シリコン膜厚さ：2.0mm

$$M_{\theta} = M_{25} \times 1.05^{(\theta-25)} \quad \dots (3-15)$$

M_{θ} : 温度 $\theta^{\circ}\text{C}$ の時の単位時間当たり放散量 [mg/h]

M_{25} : 温度 25°C の時の単位時間当たり放散量 [mg/h]

C_6F_6 、 C_7F_8 に関しては、温度が上昇するにつれて単位時間当たり放散量が増加する傾向が、各条件において良い相関で見られた。 C_7F_{14} に関しては、クリンプバイアルのシリコン膜厚さ 1.0mm、1.5mm 以外の条件では、単位時間当たり放散量のばらつきが見られたが、確定係数 0.91 以上の相関が得られた。

PFT の気中濃度はサンプリングレート実験から精度が確保できる気中濃度範囲に入るよう PFT 放散量を調整する必要がある。そのため、放散源は室容積及び換気量により、放散量を調整するために多様な膜の組み合わせが考えられる。その際には、簡易的に以下の式を用いて温度補正を行うこととした。

【温度による簡易放散量換算式】

$$\cdot \text{C}_6\text{F}_6 : M_{\theta} = M_{25} \times 1.04^{(\theta-25)} \quad \dots (3-16)$$

$$\cdot \text{C}_7\text{F}_8 : M_{\theta} = M_{25} \times 1.04^{(\theta-25)} \quad \dots (3-17)$$

$$\cdot \text{C}_7\text{F}_{14} : M_{\theta} = M_{25} \times 1.04^{(\theta-25)} \quad \dots (3-18)$$

M_{θ} : 温度 $\theta^{\circ}\text{C}$ の時の単位時間当たり放散量 [mg/h]

M_{25} : 温度 25°C の時の単位時間当たり放散量 [mg/h]

3.4 パッシブサンプラー

換気量測定時に使用するパッシブサンプラー⁷⁾⁹⁾として、パッシブガスチューブ（柴田化学社製）¹⁰⁾を用いる。このパッシブガスチューブは、拡散チューブに粒状活性炭を充填した無指向性のサンプラーであり、測定時には専用の保持器具（治具）を使用する。寸法約 $\Phi 8 \times 54 \pm 3\text{mm}$ で、重量は約 2.3mg である。図 3-16 にパッシブガスチューブの概要図を、図 3-17 にパッシブガスチューブで拡散膜として用いられている PTFE-tube の電子顕微鏡拡大図を示す。

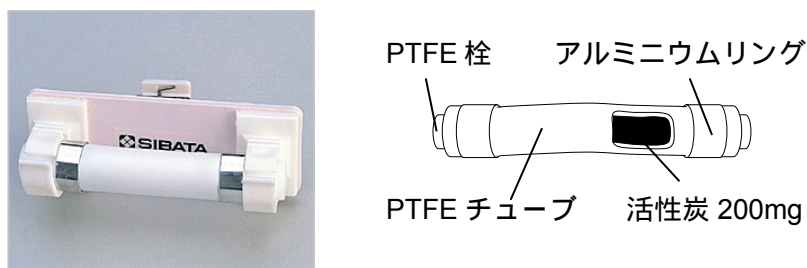


図 3-16 パッシブガスチューブ概要図

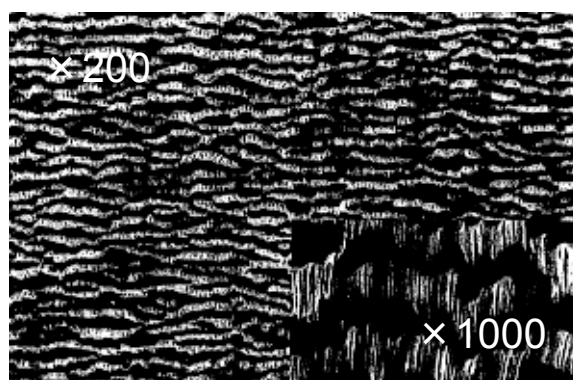


図 3-17 PTFE-tube 電子顕微鏡拡大図

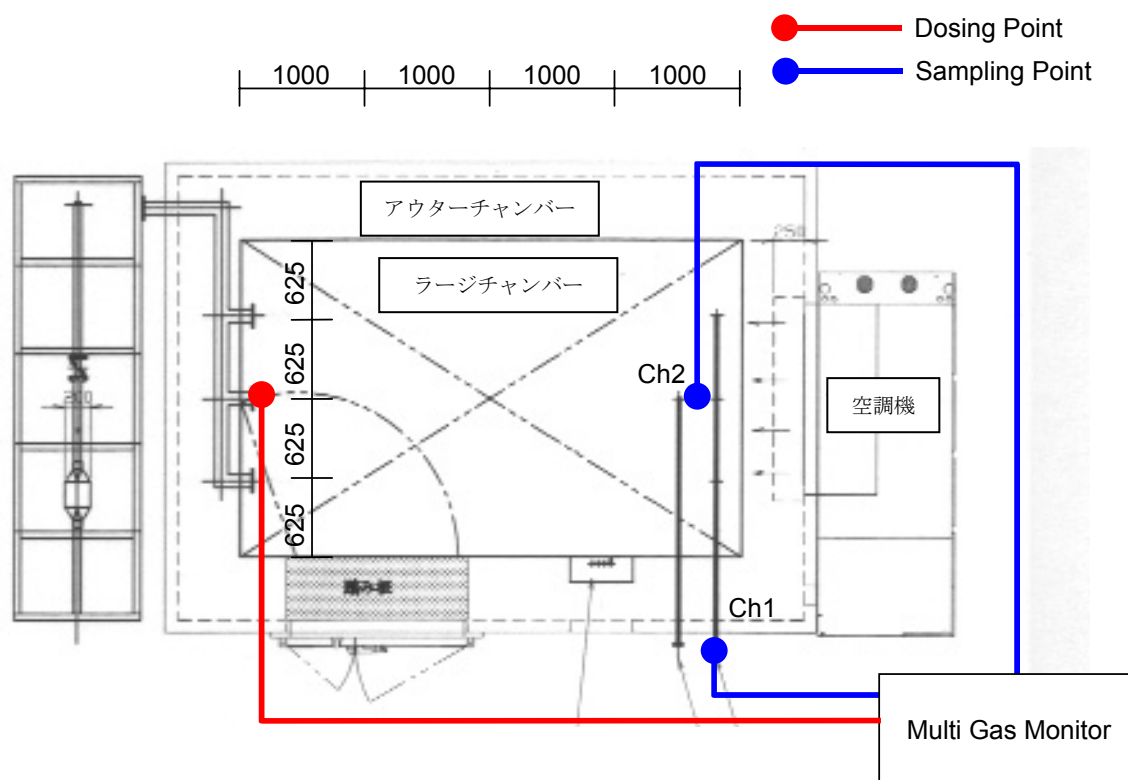
この PTFE-tube は DSD-DNPH 拡散サンプラーやパッシブサンプラー VOC-SD に用いられている PSP-tube より、柔軟性があり、変形しやすいことから、拡散面積を一定に保つことが困難であると考えられている。PTFE-tube は延伸して作られている為、通気部の形状が線状であり、柔軟性・弾力性に富んでいる。図 3-17 に示す電子顕微鏡拡大図において、通気部と交差して太い帯状の部分があるが、これは延伸されなかった部分である。この PTFE-tube の隙間の幅は約 $0.2\mu\text{m}$ であり、空孔率は 48% である。PSP-tube と比較すると空孔率が低いため、アップテイクレート (Uptake Rate) が小さくなり、それに伴ってサンプリングレート (Sampling Rate) も小さくなる。

3.5 サンプルングレート算出実験

パッシブサンプラーを用いるパッシブ測定法では空気吸引を行わないためアクティブ法で用いる気中濃度算出式と同じ式を用いると、吸引流量から算定される容積当たりの気中濃度の計算ができない。そのため、アクティブ法の吸引流量に該当する「サンプルングレート (Sampling Rate : 相当吸引速度、ml/min)」という各物質に対するサンプラーの固有な吸着能力を表す係数を用いる。このサンプルングレートを理論的に推定する式は存在するがあくまでも推測値であるため、実験から求めている。

パッシブサンプラーのパッシブガスチューブが C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} に対して有するサンプルングレートの算定のため $23.8m^3$ のステンレス製 (SUS304) 大形チャンバー^{15) 16)}を用いて、5つのPFT濃度条件におけるパッシブサンプラーのサンプルングレート実験を行った。

図3-18に本実験で使用する大形チャンバーの平面図及び SF_6 測定器具設置図を示す。また、表3-2に実験条件を示す。



) Ch1 はチャンバー外排気部、Ch2 はチャンバー内排気口付近に設置

図 3-18 大形チャンバー平面図

表 3-2 サンプルングレート算出実験条件

チャンバー内設定温度		25°C
相対湿度		50%
温湿度測定器具		TABAI ESPEC THERMO RECORDER RS-11
設定換気回数		0.5, 1.0, 2.0 [回/h]
アクティブ法	Tracer gas	SF ₆
	測定機器	Multi-Gas Monitor (B & K1302) Doser & Sampler (B&K1303)
パッシブ法	Tracer gas	C ₆ F ₆ , C ₇ F ₈ , C ₇ F ₁₄
	放散源	パーミエーションチューブ (C ₆ F ₆ , C ₇ F ₈): 各 1 本 クリンプバイアル瓶 (C ₇ F ₁₄): 1 本
	放散量計量	電子天秤 (A&D 社製 GR-300)
	Sampler	パッシブガスチューブ : 7 本 (TB 含)
	分析方法	溶媒抽出、GC/MS 分析

本実験では、チャンバー内の設定換気回数の確認を行うため、アクティブ法を用いて換気量測定を行った。マルチガスモニター (B&K1302) 及びドーズ&サンプラー (B&K1303) を用いてトレーサーガスの濃度を測定し¹⁷⁾、ステップダウン法で換気量を算定した。

PFT は C₆F₆、C₇F₈、C₇F₁₄ の 3 種類を使用した。C₆F₆、C₇F₈ においては放散源としてパーミエーションチューブ¹⁸⁾を、C₇F₁₄ に関してはクリンプバイアル瓶を用いた PFT 放散源を使用した。パーミエーションチューブを図 3-19 に、クリンプバイアル瓶を用いた PFT 放散源を図 3-20 に示す。PFT の捕集はパッシブガスチューブ (柴田化学社製) を用いて 24 時間行った。回収後溶媒抽出を行い、GC/MS で分析を行った^{19) 20)}。

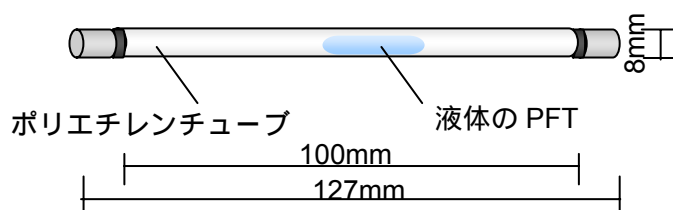


図 3-19 パーミエーションチューブ PFT 放散源

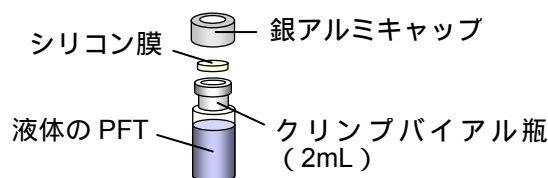


図 3-20 クリンプバイアル PFT 放散源

パッシブ法による実験概要図を図 3-21 に、実験風景を図 3-22 に示す。チャンバー内の PFT 濃度分布を確認するため、測定は2点で行った。

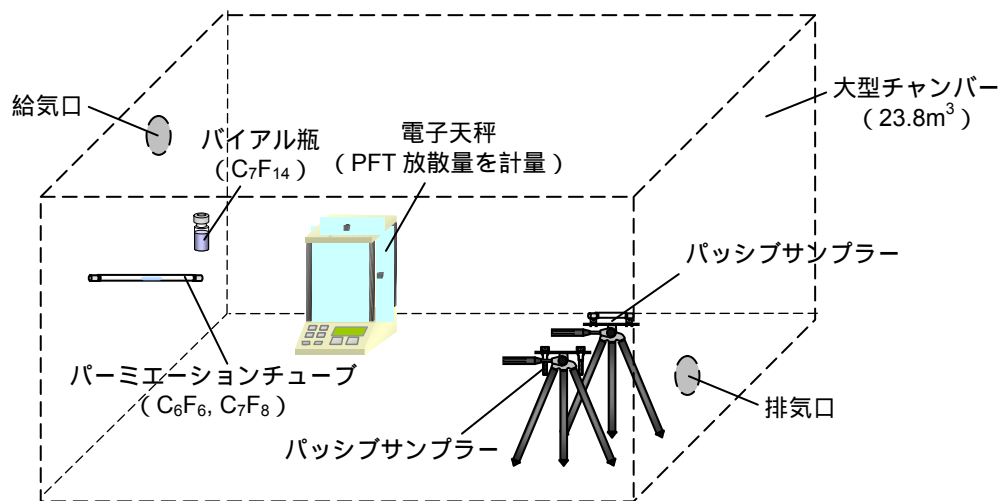


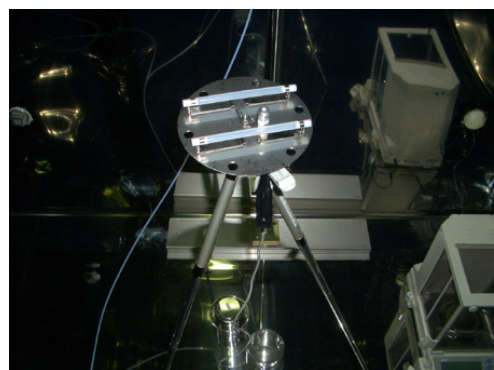
図 3-21 サンプルングレート算出実験概要図



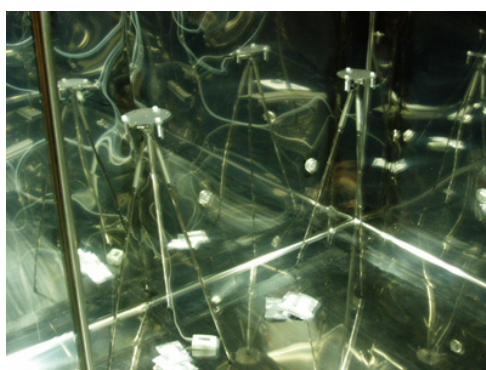
大形チャンバー外観



B&K1302, 1303



PFT 放散源設置図（パッシブ法）



サンプリング位置（パッシブ法）

図 3-22 サンプルングレート実験風景

実験結果を表 3-3 に示す。また、各 PFT の気中濃度と捕集量との関係を図 3-23～3-25 のグラフに示す。

表 3-3 サンプルングレート算出実験結果

	放散量 [$\mu\text{g/h}$]	換気量 [m^3/h]	換気 回数	気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	サンプラー 捕集量 [μg]	K [m^3/h]	K [mL/min]
C_6F_6	1763	47.6	2.0	37.0	1.68	0.00189	31.5
	1796	23.8	1.0	75.5	4.26	0.00235	39.2
	1783	11.9	0.5	149.8	7.48	0.00208	34.7
	4185	11.8	0.5	351.7	21.19	0.00251	41.8
	5102	11.8	0.5	428.7	26.65	0.00259	43.2
C_7F_8	204	47.6	2.0	4.3	0.20	0.00194	32.4
	229	23.8	1.0	9.6	0.48	0.00208	34.6
	213	11.9	0.5	17.9	0.83	0.00193	32.2
	2404	11.8	0.5	202.0	12.46	0.00257	42.8
	3038	11.8	0.5	255.3	16.57	0.00270	45.1
C_7F_{14}	767	47.6	2.0	16.1	0.65	0.00168	28.0
	767	23.8	1.0	32.2	1.82	0.00235	39.2
	758	11.9	0.5	63.7	3.19	0.00209	34.8
	1201	11.8	0.5	101.0	5.25	0.00217	36.1
	1442	11.8	0.5	121.2	6.33	0.00218	36.3

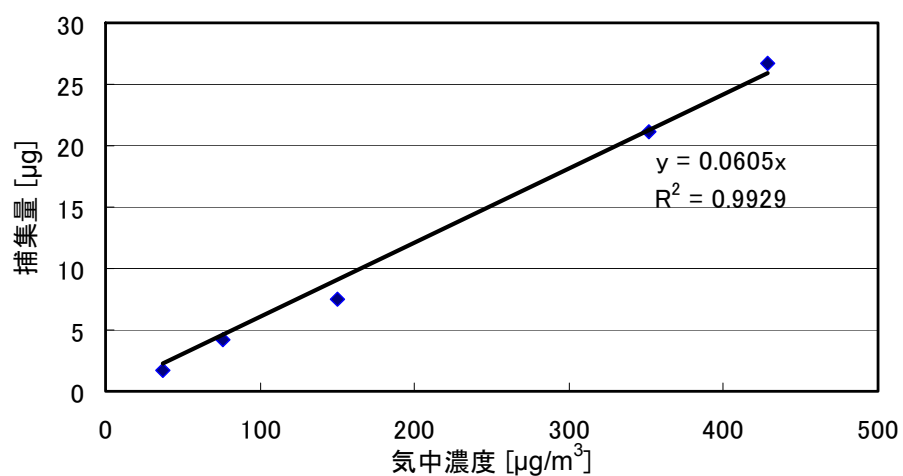


図 3-23 C_6F_6 の気中濃度と捕集量の関係

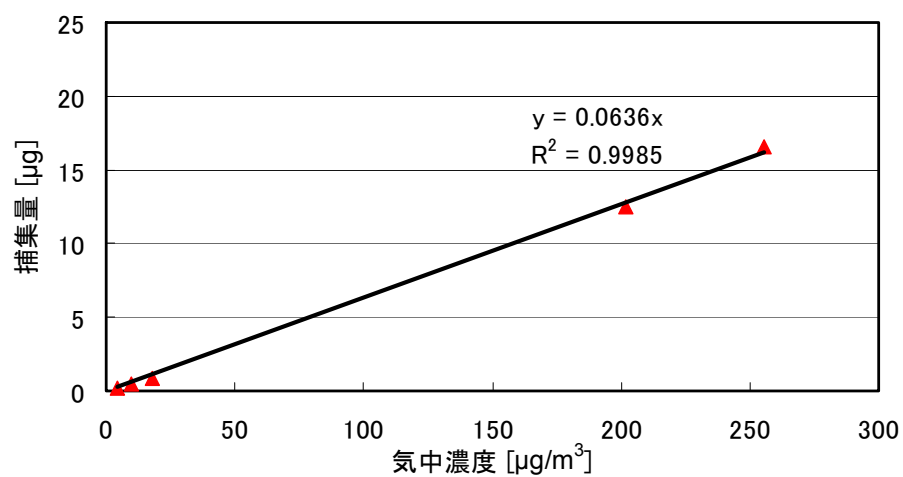


図 3-24 C_7F_8 の気中濃度と捕集量の関係

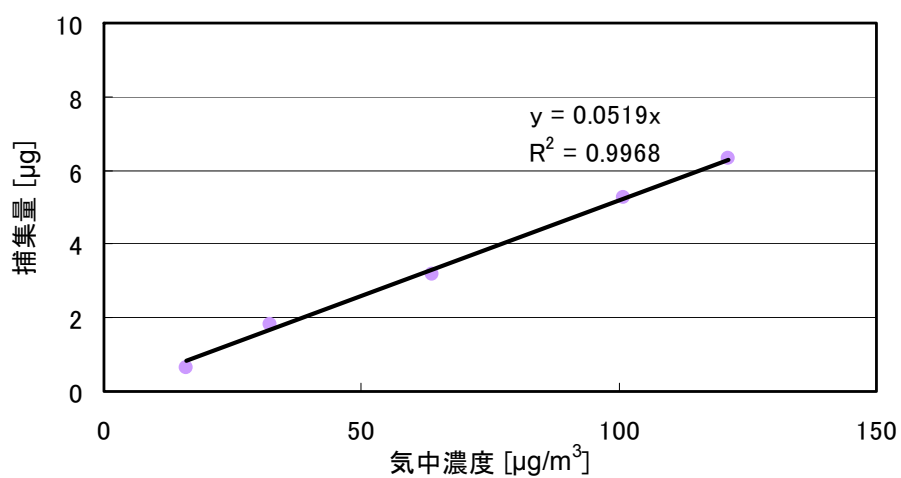


図 3-25 C_7F_{14} の気中濃度と捕集量の関係

図 3-23～3-25 の直線の比例関数の傾きより算出したサンプリングレートを表 3-4 に示す。

表 3-4 サンプリングレート算出結果 [25 条件]

	K [m ³ /h]	K [mL/min]
C ₆ F ₆	0.00267	42.0
C ₇ F ₈	0.00276	44.2
C ₇ F ₁₄	0.00226	36.0

PFT 気中濃度と捕集量による比例関数の決定係数 (R^2) は 0.99 以上で高い相関を示した。また、表 3-4 の結果は雰囲気温度 25 でのサンプリングレートであるため、実測などで使用する際には雰囲気温度を測定し、温度換算式 (3-3) を用いて温度補正をする必要がある。

今後は表 3-4 のサンプリングレートを用いて PFT 換気量測定における PFT の気中濃度を算出する。

3.6 誤差評価法を用いた換気量算出式の検討

換気量算定時には第1章で説明した式(1-19)～式(1-30)の連立方程式を用いるが、確定的方法で計算すると誤差から発生した不自然な結果値が算出される場合がある。そのため、確定的方法ではなく誤差を認めながら、その誤差を最小限にするため統計的方法である最小二乗法を用いた。

換気量計算には理論式に拘束条件を付加し、計算の誤差を最小二乗法^{11) 12) 13) 14)}で評価して結果の算定を行う。

(1) 拘束条件

換気量 Q の各要素を非負値 (0) とする。また、物理的に繋がっていないゾーン間の空気交換量は 0 とする。

(2) 最小二乗法

最小二乗法は、実験で得られた数値の組がもつ相関関係の描くグラフを、あるモデルから想定される一次関数や対数曲線など特定の関数を用いて近似するときに、実験値に対してよい近似となるように、誤差(残差)の平方和を最小とする係数を決定する方法、あるいはそのような方法によって近似を行うものである。

例として、測定値は x, y の二次元の平面に分布するものとし、想定される分布が $y = f(x)$ の形である場合に実、験で得られた次のような数値の組の集合があるとする。

$$(x,y)=(x_1,y_1),(x_2,y_2),\dots,(x_n,y_n) \quad \dots (3-19)$$

これら (x, y) の分布が、 $y = f(x)$ という関数に従うと仮定したとき、想定される理論値は $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), \dots, (x_n, f(x_n))$ となり、測定値との残差は、各 i につき $|y_i - f(x_i)|$ となる。ここで、理論値からの誤差の分散は残差の平方和

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad \dots (3-20)$$

で与えられる。式(3-20)は $y = f(x)$ に現れる係数を変数とする関数と見なすことができるので、式(3-20)を計算して各係数について偏微分し、得られたそれぞれの式で式(3-20)を最小にするような係数の条件を求めて連立方程式として解き、誤差が最も少なくなる係数を確定すればよい。

実測結果においては、(1) 拘束条件に示す条件下で、3ゾーンの理論式である式(3-21)～式(3-32)の(左辺－右辺)の平方和が最小となる Q を近似的に求める。

(3) 最小二乗法による換気量計算

3 ゾーンの場合の最小二乗法による換気量計算について検討した。既往研究で用いた3ゾーンの理論式は式(1-19)～(1-30)と表されているが、物質収支式には誤差(残差)Eが生じる。

新しい式では、拘束条件として換気量の各要素を非負値($Q \geq 0$)とすることに加え、物理的に連結されていないゾーンがある場合はそのゾーン間の空気交換量を0とする。

最小二乗法による換気量計算に用いる物質収支式を式(3-21)～(3-29)に、空気流量収支式を式(3-30)～(3-32)に、換気量Qの与条件を式(3-33)～(3-37)に、誤差評価式を式(3-38)に示す。

誤差 $E_{A1} \sim E_{C3}$ の平方和の最小値を求め、この時の換気量Qを近似的に求める。

【ZONE 1 における物質収支式】

$$A : Q_{2,1}C_{A2} + Q_{3,1}C_{A3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{A1} = -M_A + E_{A1} \quad \dots (3-21)$$

$$B : Q_{2,1}C_{B2} + Q_{3,1}C_{B3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{B1} = 0 + E_{B1} \quad \dots (3-22)$$

$$C : Q_{2,1}C_{C2} + Q_{3,1}C_{C3} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3})C_{C1} = 0 + E_{C1} \quad \dots (3-23)$$

【ZONE 2 における物質収支式】

$$A : Q_{3,2}C_{A3} + Q_{1,2}C_{A1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{A2} = 0 + E_{A2} \quad \dots (3-24)$$

$$B : Q_{3,2}C_{B3} + Q_{1,2}C_{B1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{B2} = -M_B + E_{B2} \quad \dots (3-25)$$

$$C : Q_{3,2}C_{C3} + Q_{1,2}C_{C1} - (Q_{2,0} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{C2} = 0 + E_{C2} \quad \dots (3-26)$$

【ZONE 3 における物質収支式】

$$A : Q_{1,3}C_{A1} + Q_{2,3}C_{A2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{A3} = 0 + E_{A3} \quad \dots (3-27)$$

$$B : Q_{1,3}C_{B1} + Q_{2,3}C_{B2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{B3} = 0 + E_{B3} \quad \dots (3-28)$$

$$C : Q_{1,3}C_{C1} + Q_{2,3}C_{C2} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2})C_{C3} = -M_C + E_{C3} \quad \dots (3-29)$$

【空気流量収支式】

$$Q_{0,1} = Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} - Q_{2,1} - Q_{3,1} \quad \dots (3-30)$$

$$Q_{0,2} = Q_{2,0} + Q_{2,1} + Q_{2,3} - Q_{1,2} - Q_{3,2} \quad \dots (3-31)$$

$$Q_{0,3} = Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} - Q_{1,3} - Q_{2,3} \quad \dots (3-32)$$

【拘束条件】

$$Q_{n,m} \geq 0 \quad \dots (3-33) \quad Q_{n,0} \geq 0 \quad \dots (3-34) \quad Q_{0,m} \geq 0 \quad \dots (3-35)$$

$$Q_{1,3} = 0 \quad \dots (3-36) \quad Q_{3,1} = 0 \quad \dots (3-37)$$

【誤差評価式】

$$f(Q) = E_{A1}^2 + E_{B1}^2 + E_{C1}^2 + E_{A2}^2 + E_{B2}^2 + E_{C2}^2 + E_{A3}^2 + E_{B3}^2 + E_{C3}^2 = \min \quad \dots (3-38)$$

物質 A, B, C	: $C_6F_6, C_7F_8, C_7F_{14}$
$Q_{n,m}$: ZONE n から m への空気交換量 [m^3/h]
$Q_{1,0}, Q_{2,0}, Q_{3,0}$: 各 ZONE から外への排気量 [m^3/h]
$Q_{0,1}, Q_{0,2}, Q_{0,3}$: 外から各 ZONE への外気導入量 [m^3/h]
M_A, M_B, M_C	: $C_6F_6, C_7F_8, C_7F_{14}$ の放散量 [$\mu g/h$]
C_{An}, C_{Bn}, C_{Cn}	: ZONE n における物質の気中濃度 [$\mu g/m^3$]
E_{An}, E_{Bn}, E_{Cn}	: ZONE n における物質収支に生じる誤差

3.7 まとめ

本章では、本研究における「PFT 法を用いた換気量測定法」について説明した。また、PFT 放散源の開発、温度変化による放散量補正式の算出実験、 C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} の 3 物質に対するパッシブサンプラーのサンプリングレート算出実験結果についてまとめた。更に、これまでの算出式として用いていた確定的方法に誤差評価を加えた統計的手法を取り入れた。

本章の内容を以下に要約する。

- 1) PFT 法を用いた換気量測定法は、測定対象空間や住戸をゾーン分けし、ゾーン毎に異なる PFT 物質の放散源を設置し、拡散膜を通して放散させる。パッシブサンプラーを設置し、移流と拡散により移動する PFT を捕集する。吸着した PFT を脱離後、ガスクロマトグラフシステムを用いて分析を行う。換気量は、既知であるトレーサーガスの放散量と、検出された捕集量から算出された気中濃度によって算定される。
- 2) 本研究で用いる PFT 放散源は 2ml 容量のクリンプバイアルとシリコン膜を基本とする。バイアルに 1mm 厚のシリコン膜、5mm 厚のシリコン膜、また穴径を調整したアルミ板を 1mm のシリコン膜の上下に貼り合わせることで放散源からの放散量を調整する方法を開発した。
- 3) PFT 放散源の放散量実験を行い、温度変化による放散量の温度補正式を導出した。また、放散膜の多様な組み合わせにより、正確に当てはまる補正式がない場合に用いる簡易補正式として $1.04^{(0.25)}$ を用いることとした。
- 4) パッシブサンプラーの C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} に関するサンプリングレート算出実験を、 23.8m^3 ステンレス製大型チャンバーにおいて、換気量と放散量を変えた 5 条件下で行った。結果からサンプリングレートは雰囲気温度 25°C 基準、 $C_6F_6=42.0\text{ ml/min}$ (決定係数 $R^2=0.9929$)、 $C_7F_8=44.2\text{ ml/min}$ (決定係数 $R^2=0.9985$)、 $C_7F_{14}=36.0\text{ ml/min}$ (決定係数 $R^2=0.9968$) が得られた。
- 5) 換気量算定式としては既存の連立方程式を確定的方法で解く方法から、換気に関する現実的な仮定を拘束条件として加えた最小二乗法を取り入れた統計的方法を用いることで、精度向上を図り PFT 法の信頼性を高めた。

【参考文献】

- 1) 田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、吉田和之、柏原誠一、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その19 PFT法を用いた換気量簡易測定法検討実測、日本建築学会大会学術講演 概要集、D-2、pp.913-914、2005
- 2) 服部将志、田中祐輔、窪田圭佑、金勲、田辺新一、柏原誠一、吉田和之：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その23 戸建住宅におけるPFT法、CO₂一定濃度法、SF₆一定濃度法、風量測定法を用いた換気量測定の比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.921-922、2006
- 3) 柏原誠一、松田克己、吉田和之、今井秀秋、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その24 戸建住宅実測におけるPFT法の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.923-924、2006
- 4) 金勲、李晟在、成旻起、田辺新一：パッシブ測定法を用いた韓国新築集合住宅の室内空気質調査、日本建築学会環境系論文集、第608号、pp.31-38、2006
- 5) 空気調和・衛生工学会：トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工学会規格、2004
- 6) 空気調和・衛生工学会：室内換気効率の現場測定法・同解説、空気調和・衛生工学会規格、2002
- 7) ISO : Indoor, ambient and workplace air. Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography. Diffusive sampling, ISO 10617-2, 2003
- 8) Seiichi Tabuchi, Marina Asai, Satoshi Sakai, Noriko Marumoto and Shin-ichi Tanabe : Application of a simple method for detection and quantifying VOC sources, Proceedings of Roomvent 2004, Indoor Air Quality, CD-ROM, 2004
- 9) シグマアルドリッチジャパン株式会社：室内大気パッシブサンプラー、VOCs 捕集用（溶媒抽出タイプ）高性能パッシブサンプラーVOC-SD 取扱説明書、スペルコ事業部
- 10) 柴田化学株式会社：パッシブガスタンク使用マニュアル
- 11) 中川徹：最小二乗法による実験データ解析、東京大学出版会、1982
- 12) 田島稔、小牧和雄：最小二乗法と測量網平均の基礎、東洋書店、2001
- 13) S.L. Miller, K. Leiserson and W.W. Nazaroff : Nonlinear least-squares minimization applied to tracer gas decay for determining airflow rates in a two-zone building, Indoor Air 1997, Vol.7, pp. 64-75,1997
- 14) J. Sateri, A. Majanen : The evaluation of field measurements of ventilation parameters made using the passive perfluorocarbon method, Clima 2000, Vol.1, pp.282-289, 2000
- 15) 日本工業規格：建築材料などからのホルムアルデヒド放散測定方法—大形チャンバー法、JIS A 1911、2006
- 16) 日本工業規格：建築材料などからの揮発性有機化合物（VOC）、及びホルムアルデヒドを除く他のカルボニル化合物放散測定方法—大形チャンバー法、JIS A 1912、2008
- 17) Peter W. Grieve : Measuring ventilation using tracer-gas, Brüel & Kjær, 1989
- 18) 株式会社ガステック：校正用ガス調製装置パーミエーターPD-1B、PD-1B-2、取扱説明書

- 19) 佛願道男、井上嘉則、青山哲也、細川利昭、関根嘉香：VOCs 用高感度パッシブ型捕集管、日立化成テクニカルレポート NO.41、2003
- 20) 森田昌敏他：有害大気汚染物質測定の実際、社団法人日本環境衛生センター、1997

第4章

パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF₆ 法、CO₂ 法、差圧測定法の 周期変動条件下における比較実験

第4章 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF₆ 法、CO₂ 法、 差圧測定法の周期変動条件下における比較実験

4.1 背景と目的

本研究では PFT 法(Perfluorocarbon Tracer Gas Technique)^{1)~5)}を用いた換気量測定法に関する研究^{6)~10)}を行ってきた。パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法は大型の機器や装置等が不要で人間の活動に支障を来さずに数時間から数週間の期間中平均換気量測定が可能である。

PFT 法は測定期間中の物質発生量と気中濃度から平均換気量を求める方法であるが、ガスモニターを用いるトレーサーガス法は短周期で発生量及び気中濃度を計測し、短時間における換気量を求めることが可能であり、時間平均換気量はこの計測値を平均して求める。

即ち、アクティブ手法のトレーサーガス法^{11) 12) 13)}は短い時間差の任意時刻 t_2 と t_1 におけるドーピング量、気中濃度が測定でき、更に時間平均換気量を算定することが出来る。

PFT 法はガス放散とサンプリングをパッシブ手法を用いて行うため、測定期間中の短時間差を持つ任意時刻 t_2 と t_1 における気中濃度の測定が困難である。特に、外乱変動や室内気流の発生がある場合は測定期間が長い PFT 法において誤差が大きくなる可能性がある。

本研究で用いている PFT 法において、バイアル瓶に入った PFCs (Perfluorocarbons) の放散源(ドーザー)は点放散であり、放散膜を通じて一定発生するため室内濃度は室内の対流や発生気流による移流に依存する。外乱変動の激しい場合や局所換気性状に分布がある場合は十分に混合されず、濃度勾配が付いた状態でサンプラーに捕集されてしまう可能性が指摘されている。

そこで、南北面外壁における差圧を一定に調節できる設備を設けた多数室を有する実大実験集合住宅において外乱変動を模擬し、4 条件の圧力条件を設定して実験を行った。測定法としては PFT 連続発生法(簡易一定発生法、以下 PFT 法)、ガスモニターを用いた SF₆ 連続供給法(Sulfur hexafluoride constant-injection method、以下 SF₆ 法)及び CO₂ 一定濃度法(Carbon dioxide constant-concentration method、以下 CO₂ 法)を用いた¹²⁾。SF₆ 法及び CO₂ 法の測定には分析方法の異なる測定装置を用いたため、それぞれ分析にかかる時間から測定間隔を設定し、サンプリング周期を SF₆ 法は約 2 分 20 秒、CO₂ 法は約 15 分とした。同時に差圧測定を行い換気回路網を用いて外気導入量の計算を行った結果(以下、差圧法)を実測値と比較した。

4.2 PFT 法概要

PFT 法は連続発生法（簡易一定発生法、濃度平均法）に属する。PFCs (Perfluorocarbons)をトレーサーガスとして用い、発生量及び気中濃度の測定から換気量を求める。PFT 法を用いた換気量測定法は W.J.Fisk¹⁾や H.Stymne²⁾等の研究者により提案・開発された方法であり、以下のような特徴を持つ³⁾⁴⁾。

- 1) 自然界に存在しない物質であるため外気及び室内空気のバックグラウンド濃度は無視できる。
- 2) PFCs は化学的・物理的に安定である。
- 3) 揮発性を持ち、固体吸着剤で捕集できる。
- 4) 低濃度でもガスクロマトグラフや分析器等で定量できる。
- 5) PFCs の種類を増やす事で多数室における外気導入量及び室間空気交換量が算定できる。
- 6) 経済的に合理的な価格で入手できる。

更に、本論文で研究を行っている PFT 法は上記内容に加えて、市販のパッシブサンプラーを用い、トレーサーガスとして用いている PFC 3 物質のサンプリングレート (Sampling Rate) を公開していること、他の PFT 法が数日から数週間のサンプリング期間を設けることに対し、化学物質捕集感度を上げるにより 1 日程度でも測定が可能であることが特色である^{6)~10)}。

4.3 実験概要

4.3.1 実験対象住宅

実験は2005年11月14日～11月21日に茨城県つくば市にある建築研究所の実験集合住宅の201号室（図4-1の実験集合住宅外観写真中2階の右端）において行った。図4-1に実験集合住宅の外観及び換気ダクトを、図4-2に平面図及び各測定点を示す。

南側室をゾーン1、北側室をゾーン2とした。ゾーン1の気積は100m³、ゾーン2は106m³である。今回の実験集合住宅内には家具や什器などはない。ゾーン1は間仕切りのない居間であり、ゾーン2にある部屋2室はドアを開放し、開口部の前に攪拌ファンを設置している。攪拌ファンは首振り式であり、ゾーン1に2台、ゾーン2に4台を設置した。小さな容積の室で攪拌ファンを用いているため瞬時一様拡散と仮定し、有効混合容積はゾーン1とゾーン2の容積を合わせた容積とした。

住宅の南北外壁の外部に設けたチャンバーに加圧用ファンを設置している。チャンバー内を加圧することで差圧の大きさと向きを変化させ、この差圧により実験住宅に設置された自然換気装置及び隙間を通じた外気導入を行った。



図 4-1 実験集合住宅外観及び換気ダクト

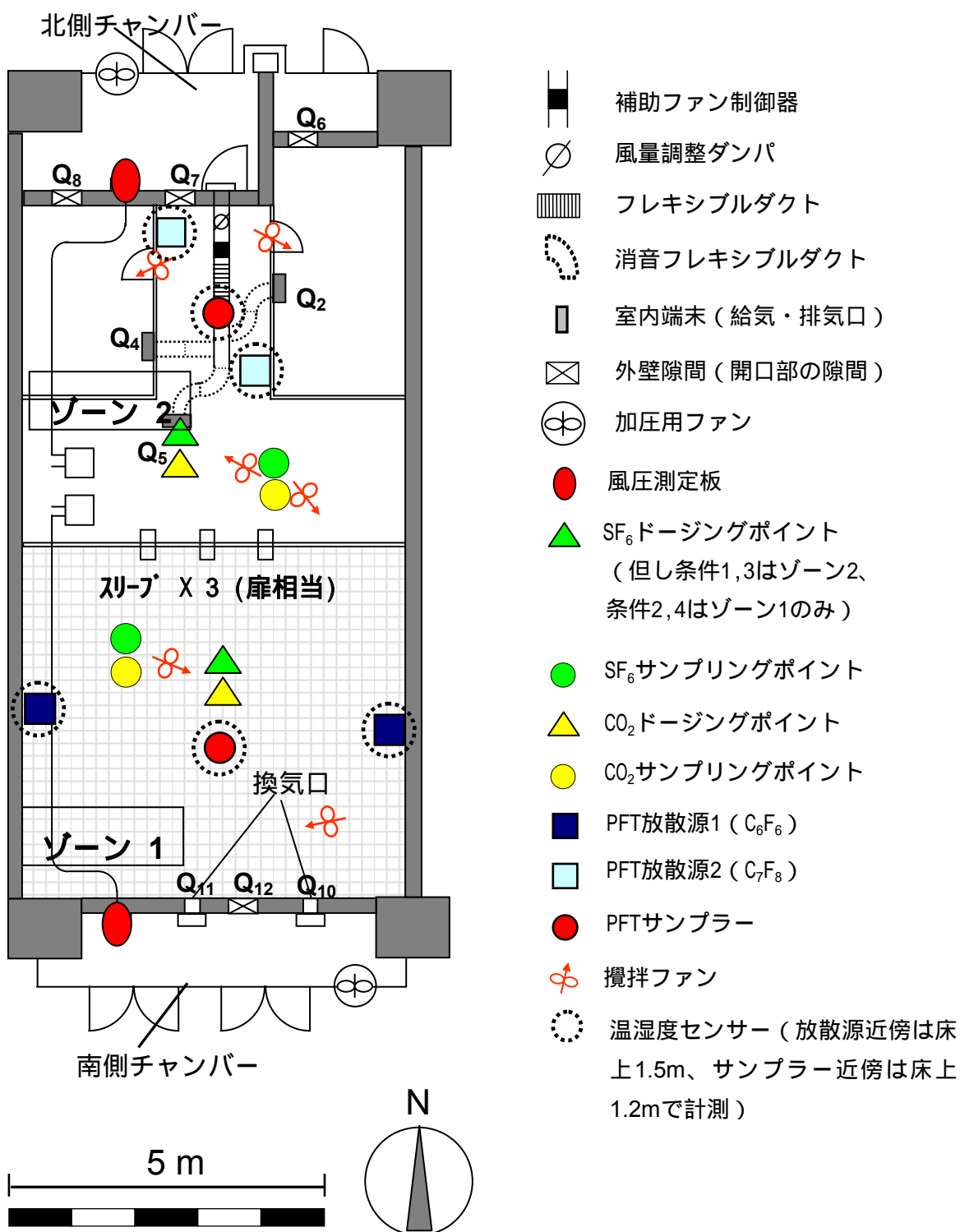


図 4-2 実験集合住宅平面図及び各測定点

圧力の周期的な変動はタイマー付きコントローラーを用いた。図 4-3 に加圧用ファン及びコントローラー・タイマーを示す。この住宅には常時換気用のハイブリッド換気システムが設置されている。本実験は換気システムの補助ファンを停止し南北面差圧のみによる自然換気が行われる状態とした。ダクトに設置されているダンパは過大換気を防止するためダンパ前後の差圧が給気時 2.4Pa、排気時 2.8Pa 以上では羽根が閉じ通過風量を抑制するように設計されている。

北側外壁面と南側外壁面との差圧が北正圧 0～29.9Pa の範囲では差圧の増加につれ外気導入量が増加するが、30～42Pa の範囲では 29.9Pa 時より低い外気導入量となる。南正圧である場合、その境界値は 33.9Pa である¹⁴⁾。



図 4-3 加圧用ファン及びコントローラー・タイマー

4.3.2 実験条件

圧力設定条件を表 4-1 に、換気量測定法の適用条件及び測定項目・測定機器を表 4-2 に示す。圧力条件を 4 条件設定し、PFCs、SF₆、CO₂ をトレーサーガスとして外気導入量（PFT 法はゾーン間の空気交換量も算定）の測定を行った。

また、南北外壁面と室内との差圧を測定し、各室への外気導入量及び放散物質の気中濃度を計算した。この実験集合住宅に関しては佐藤らが研究を行っており、開口部・換気設備の換気特性及び換気回路網を示している¹⁴⁾。それらの結果により差圧 10Pa で北正圧時 98 m³/h（0.47 回/h）、南正圧時 97 m³/h（0.47 回/h）、28Pa で北正圧時 177 m³/h（0.86 回/h）、南正圧時 173 m³/h（0.84 回/h）の外気導入量（換気回数）が予測された。

条件 1 に換気回数 0.86 回/h を設定し、その他の 3 条件においては居室における必要換気量付近である 0.47 回/h の換気回数を想定した。

条件 1 は 0.86 回/h、北正圧 24 時間、条件 2 は 0.47 回/h、北正圧 24 時間、条件 3 は 0.47 回/h、北正圧 12 時間、南正圧 12 時間である。

条件 4 は 0.47 回/h、北正圧と南正圧が 2 時間毎に交互する場合の PFT 法の測定精度を確認するための設定である。

表 4-1 圧力設定条件

時間	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
条件 1	N (0.86 回/h、28Pa)											
条件 2	N (0.47 回/h、10Pa)											
条件 3	N (0.47 回/h、10Pa)						S (0.47 回/h、10Pa)					
条件 4	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S		

- ・ N：北側チャンバー加圧（北風） S：南側チャンバー加圧（南風）
- ・ 差圧 10Pa、28Pa は設定目標圧力である。

条件 4：0.47 回/h、10Pa、測定時間は 20 時間とした。

表 4-2 換気量測定法の適用条件及び測定項目・測定機器

測定項目		測定法の分類	適用条件 (SHASE-S 116-2003 ³⁾)
PFT 法	外気導入量/ 室間空気交換量	連続発生法 (濃度平均法・ 簡易一定発生法)	常時室内濃度を一様にできる 有効混合容積が既知である 換気量の時間変化が無視できる 換気量変動への適用性: ×
SF ₆ 法	外気導入量/ 濃度変動	連続供給法 (逆数濃度平均 法)	常時室内濃度を一様にできる 有効混合容積が既知である 換気量変動への適用性:
CO ₂ 法	外気導入量	一定濃度法	常時室内濃度を一様にできる 換気量変動への適用性:
差圧法	南北外壁面 風圧	-	-
温湿度		-	-

測定項目		測定機器	
PFT 法	外気導入量/ 室間空気交換量	トレーサーガス	C ₆ F ₆ (ゾーン 1)、 C ₇ F ₈ (ゾーン 2)
		放散量計量	電子天秤 (A&D 社製 GR-300)
		サンプラー	柴田 パッシブガスチューブ
SF ₆ 法	外気導入量/ 濃度変動	トレーサーガス	SF ₆
		測定機器	Multi-Gas Monitor (B&K 1302) Doser & Sampler (B&K 1303)
CO ₂ 法	外気導入量	トレーサーガス	CO ₂
		測定機器	多数室換気測定器 (コーナー札幌社製 SK-001)
差圧法	南北外壁面 風圧	SETRA Systems マルチレンジ微差圧センサー Model 250	
温湿度		ESPEC Thermo Recorder RS-11	

4.3.3 測定法概要

本実験において各放散源及びサンプラーの設置位置は任意としたが、攪拌ファンにより対象室内で充分混合されるように配置した。

(1) PFT 連続発生法（簡易一定発生法、PFT 法）

PFT 放散源及びサンプラーの概要図を図 4-4 に示す。バイアル瓶に入った PFCs 溶液の蒸気がシリコン膜を通じ一定放散する。放散量はシリコン膜の厚さ及びアルミ板の穴径で調節した。住戸全体を 2 ゾーンに分け、ゾーン 1 に C₆F₆ を、ゾーン 2 に C₇F₈ を放散させた。放散量は電子天秤 (A&D 社製 GR-300) を用いて秤量を行った。PFT 放散源は捕集開始から 5 時間～24 時間前に設置し、なるべく定常状態に近付くようにした。各ゾーンにおける放散量は C₆F₆ が約 6820 μ g/h、C₇F₈ が約 2520 μ g/h であった。

また、捕集用サンプラーとしてはパッシブガスチューブを用いた。パッシブガスチューブの C₆F₆、C₇F₈ に関するサンプリングレート (Sampling Rate：相当吸引速度) 算出実験を 23.8m³ ステンレス製大形チャンバーで換気量と放散量を変えた 5 条件で行っており、結果からサンプリングレートは雰囲気温度 25°C 基準、C₆F₆=42.0 [ml/min] (決定係数 R²=0.9929)、C₇F₈=44.2 [ml/min] (決定係数 R²=0.9985) が得られた。

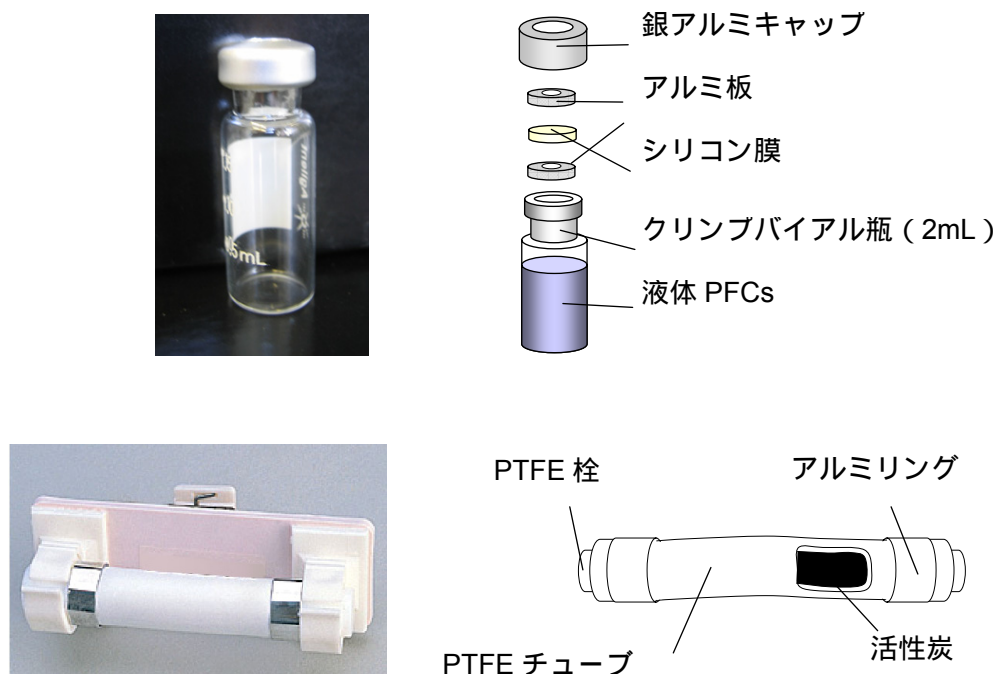


図 4-4 PFT 放散源、サンプラー概要図

また、サンプリングレートは気中濃度による依存性を少なくするため、測定の際には気中濃度を予め予測し、サンプリングレート試験から精度が確保できる気中濃度範囲 (C₆F₆: 0~430μg/m³、C₇F₈: 0~255μg/m³) に入るよう PFT 放散量を調整する。湿度依存性に関しては知見がないが、測定期間中の室内相対湿度は平均 27~39%RH (表 4-4 参照) であり、本実験に関しては相対湿度の変化幅は小さかった。

24 時間サンプリング (条件 4 は 20 時間サンプリング) 後、溶媒抽出し GC-MS で定性定量を行った。完全混合を仮定した場合、気中濃度及び平均換気量の算出式は式 (4-1) 及び式 (4-2) になる。サンプリングレートの温度補正式を式 (4-3) に示す。また、今回の実験における PFT 放散源からの放散量は電子天秤による秤量を行ったため温度補正は行っていない。

$$\bar{C} = \frac{M_a - M_{TB}}{K \times t} \times 10^6 \quad \dots\dots (4-1)$$

\bar{C} : 測定期間中の時間平均気中濃度 [μg /m³]
 M_a : 測定用サンプラーの捕集総重量 [μg]
 M_{TB} : トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]
 K : 相当吸引速度 (Sampling Rate) [ml/min]
 t : 捕集時間 [min]

$$\bar{Q} = \frac{\bar{m}}{\bar{C}} \quad \dots\dots (4-2)$$

\bar{Q} : 時間平均換気量 [m³/h]
 \bar{m} : 時間平均トレーサーガス発生量 [μg /h]
 \bar{C} : 測定期間中の時間平均気中濃度 [μg /m³]

$$K_{\theta} = K_{25} \times \frac{(273 + \theta)}{298} \quad \dots\dots (4-3)$$

K_{θ} : θ におけるサンプリングレート [ml/min]
 K_{25} : 25 におけるサンプリングレート [ml/min]

PFT 法はドーピング・サンプリング共にパッシブ法で行うため、算出できるのは測定期間中の時間平均換気量になる。多物質の放散量及び気中濃度から室間空気交換量と外気導入量を算出するためには連立方程式を用いる⁶⁾⁷⁾。また、連立方程式を解く際の誤差評価法として最小二乗法を用いた⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。

(2) SF₆連続供給法 (SF₆法)

ガスモニターとしてマルチガスモニター (B&K1302) 及びドーズー&サンプラー (B&K1303) を用いた。SF₆トレーサーガスモニターを図 4-5 に示す。SF₆は条件 1、3 ではゾーン 2 から、条件 2、4 ではゾーン 1 からドージングした。気中濃度の測定は各ゾーンで行い、サンプリング時間間隔は約 2 分 20 秒である。



図 4-5 Multi-Gas Monitor (SF₆法)

但し、PFCs の SF₆ マルチガスモニターフィルターへの干渉影響を調べるため、20L 小型チャンバーに C₆F₆ 及び C₇F₈ を放散させ、マルチガスモニターで吸引試験を行った。20L 小型チャンバー内の予想濃度はそれぞれ $1.5 \times 10^5 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ 、 $2.3 \times 10^4 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$ であり、その時の検知量は C₆F₆ が 0.05ppm、C₇F₈ が 0.18ppm であった。

実験・実測での PFT 気中濃度はこの数百～数千分の 1 程度の低い水準であり、また SF₆ も測定時の気中濃度を 5ppm 以上で使っていることからマルチガスモニターフィルターへの干渉の影響は極めて低いと判断した。

(3) CO₂ 一定濃度法 (CO₂ 法)

ガスモニターとして多数室換気測定器 SK-001 (コーナールン社製) を、トレーサースガスとして CO₂ を用いて測定を行った⁸⁾¹⁸⁾。CO₂ トレーサースガスモニターを図 4-6 に示す。一定濃度法としてターゲット濃度を 1500ppm に設定した。各ゾーンにドーザーとサンプラーを設置し、屋外に外気濃度測定用サンプリングチューブを設置した。全ての測定点のドーピング及びサンプリングが終わる 1 周期は 15 分である。

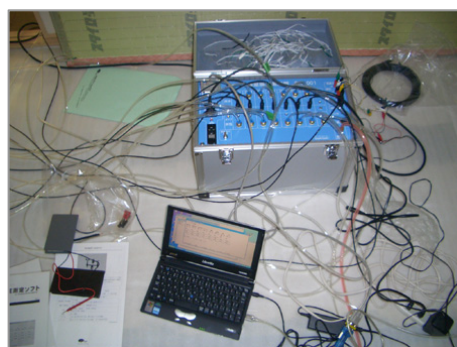


図 4-6 多数室換気測定器 (CO₂ 法)

(4) 差圧測定 (差圧法)

図 4-7 に風圧測定板及び微差圧計を示す。南側及び北側の外壁に風圧測定板を設け室内との差圧を測定した。1 秒間隔で計測し 1 分間平均値を求めた。佐藤ら¹⁴⁾はこの住宅におけるダクト系・風量調節ダンパ等の換気システム及び開口部等の隙間の換気特性を実験から求めて提示している。更に、一定差圧条件下及び自然風条件下での差圧測定を行い、換気回路網による予測値と外気導入量の実測値を比較している。本研究では測定した差圧と佐藤らにより提案された換気回路網を用いて各室への外気導入量を求めた。外気導入量の計算には表 4-3 の係数及び近似式を用い、計算は 1 分間隔で行った。

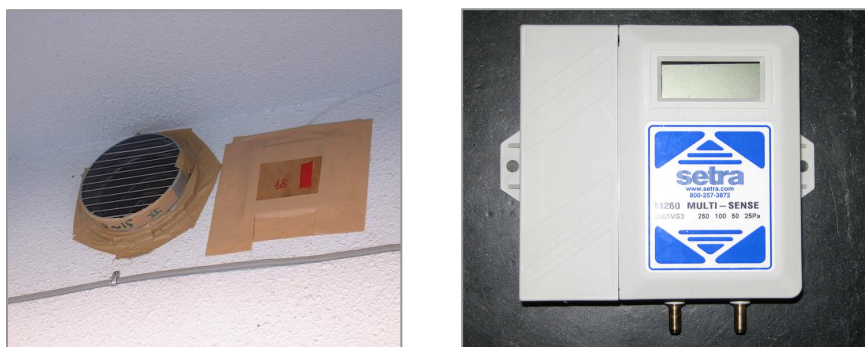


図 4-7 風圧測定板及び微差圧計

表 4-3 風量の予測近似式の係数（佐藤ら）¹⁴⁾

P	29.9	P	0	P < 29.9	-33.9	P < 0
ダクト系	給気		給気		排気	
風量	a	b	a	b	a	b
Q ₂	13.7	0.25	6.38	0.54	-8.17	0.57
Q ₄	15.9	0.28	7.53	0.56	-7.11	0.55
Q ₅	17.1	0.30	8.40	0.57	-7.22	0.54
Q ₆	2.61	0.67	2.89	0.61	-2.70	0.62
Q ₇	0.38	0.60	0.43	0.55	-0.40	0.56
Q ₈	0.55	0.87	0.62	0.79	-0.58	0.81
Q ₁₀	16.1	0.43	10.7	0.58	-11.0	0.58
Q ₁₁	16.1	0.43	10.7	0.58	-11.0	0.58
Q ₁₂	5.30	0.38	3.85	0.51	-4.15	0.49

$Q=a \times P^b$ [m³/h]：各流路は図 4-2 の平面図参照

P：北側-南側外壁面の差圧 [Pa]

符号：北側加圧が正、南側加圧が負となる

4.3.4 差圧測定結果を用いた計算の概要

放散物質・放散量及び諸条件は実測条件（表 4-1）と同様である。4 条件における外気導入量は差圧測定結果及び換気回路網から求めた。算定された外気導入量及び PFT 放散量から PFT の気中濃度を逆算し、実測から得られた PFT 気中濃度と比較検討を行う。差圧測定は 1 秒間隔であるが計算には 1 分間の平均値を用いた。物質収支式（4-4）から式（4-5）が導出される。

現在物質質量＝既存物質質量＋発生量＋流入量－除去量（流出量）

$$C_{(t)} \cdot V = C_{(t-1)} \cdot V + EF_{(t)} \cdot \Delta t + C_{o(t)} \cdot V \cdot n_{(t)} \cdot \Delta t - C_{(t)} \cdot V \cdot n_{(t)} \cdot \Delta t \quad \cdots \cdots (4-4)$$

$$C_{(t)} = \frac{C_{(t-1)} \cdot V + EF_{(t)} \cdot \Delta t + C_{o(t)} \cdot V \cdot n_{(t)} \cdot \Delta t}{V(1 + n_{(t)} \cdot \Delta t)} \quad \cdots \cdots (4-5)$$

$C_{(t)}$ ：時刻 t における対象物質の気中濃度 [μg / m³]

C_o ：外気濃度（流入物質の外気中濃度）[μg / m³]

V ：空間の気積 [m³]

$EF_{(t)}$ ：時間 t に空間で発生する対象物質の発生量 [μg/h]

$n_{(t)}$ ：時間 t における換気回数 [h⁻¹]

t ：時間間隔 [h]

4.4 測定結果

測定期間中の温湿度測定結果を表 4-4 に示す。平均外気温度 9.8～12.4℃（54～65%RH）、平均室内温度 19.1～20.9℃（27～39%RH）であった。

図 4-8 に差圧測定結果を示す。条件 1 では後半に少し圧力が低下しているが、平均 27.4Pa となっている。条件 2 は平均 11.3Pa、条件 3 においては前半 6 時間ほど高くなり北正圧 12.5Pa、南正圧 10.8Pa で、北正圧が多少高かった。条件 4 においても設定条件に近似した結果となった。また、各測定法から得られた外気導入量の結果を表 4-5 に示す。

表 4-4 温湿度測定結果

測定項目		平均気温 []	最高気温 []	最低気温 []	平均湿度 [% RH]
条件 1	外気	12.4	13.0	11.7	65
	ZONE1	20.8	21.0	20.6	39
	ZONE2	19.6	20.0	18.7	38
条件 2	外気	10.5	12.8	7.7	59
	ZONE1	20.9	21.2	20.4	34
	ZONE2	19.9	20.3	19.5	32
条件 3	外気	10.2	12.2	8.6	56
	ZONE1	20.5	20.9	20.1	31
	ZONE2	19.7	20.3	19.2	29
条件 4	外気	9.8	12.4	6.9	54
	ZONE1	19.1	19.9	17.1	29
	ZONE2	19.2	19.8	18.6	27

表 4-5 外気導入量測定結果（外気導入量：m³/h、換気回数：回/h）

測定法		条件 1	条件 2	条件 3		条件 4	
PFT 法	外気導入量	171	105	162		114	
	換気回数	0.83	0.51	0.79		0.55	
SF ₆ 法	外気導入量	157	93	100		101	
	換気回数	0.76	0.45	0.49		0.49	
CO ₂ 法	外気導入量	198	100	103		118	
	換気回数	0.96	0.49	0.50		0.57	
差圧法	外気導入量	171	105	北風	110	北風	101
				南風	102	南風	99
				平均	106	平均	100
	換気回数	0.83	0.51	北風	0.53	北風	0.49
				南風	0.50	南風	0.48
				平均	0.51	平均	0.49

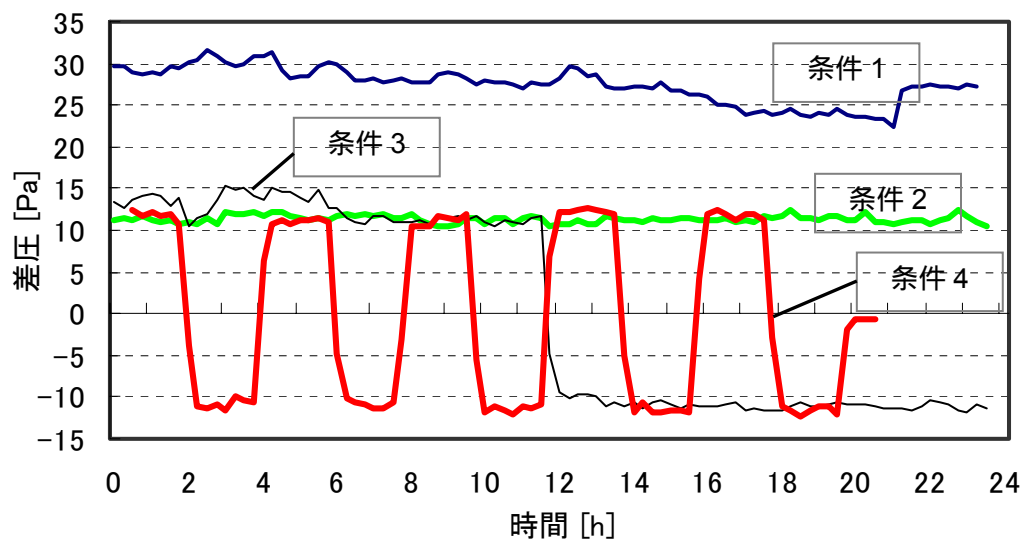


図 4-8 南北面の差圧測定結果

4.4.1 条件 1 (0.86 回/h、24 時間北正圧)

条件 1 の測定結果を図 4-9 に示す。測定期間中の平均差圧は 27.4Pa であったが、差圧 29.9Pa 時より外気導入量が少なくなる 30Pa 以上の差圧も観測されたため設定換気回数（設定差圧 28Pa）より少ない結果となった。外気導入量は SF₆ 法 157 m³/h、PFT 法 171 m³/h・差圧法 171 m³/h、CO₂ 法 198 m³/h であった。換気回数としては SF₆ 法 0.76 回/h、PFT 法 0.83 回/h、差圧法 0.83 回/h、CO₂ 法 0.96 回/h であった。

CO₂ 法の最初の部分で換気量が大きく減っているのは助走運転で室内濃度がターゲット濃度以上に上がった直後であり、ドーピング量が大幅に減少したためである。

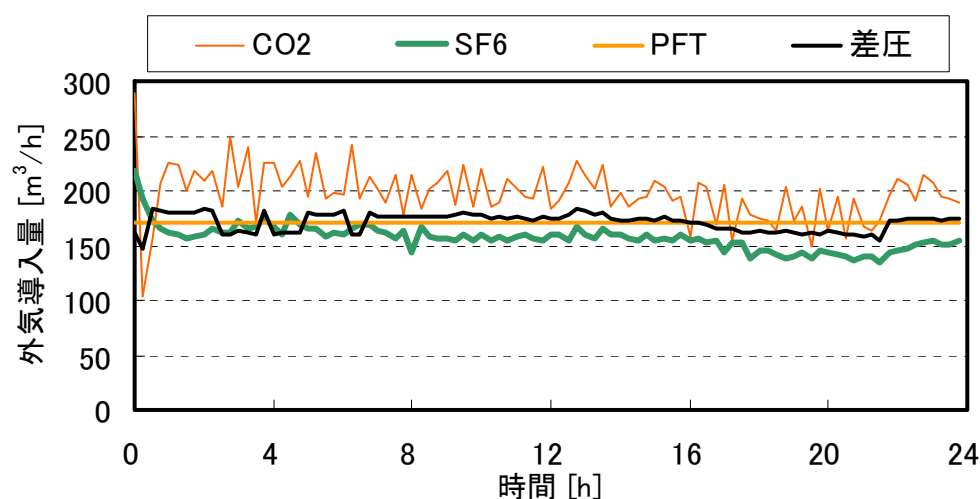


図 4-9 各測定法における外気導入量の時間変動（条件 1）

4.4.2 条件 2 (0.47 回/h、24 時間北正圧)

条件 2 の測定結果を図 4-10 に示す。設定差圧 10Pa に対し、測定期間中の平均差圧は 11.3Pa となった。

外気導入量は SF₆ 法 93 m³/h、CO₂ 法 100 m³/h、PFT 法及び差圧法は 105 m³/h となった。換気回数としては全ての測定法で約 0.5 回/h (0.45~0.51 回/h) となり良く一致した。換気回数 0.47 回/h、風向一定の条件では全ての測定法で差が小さく整合性の高い結果が得られた。

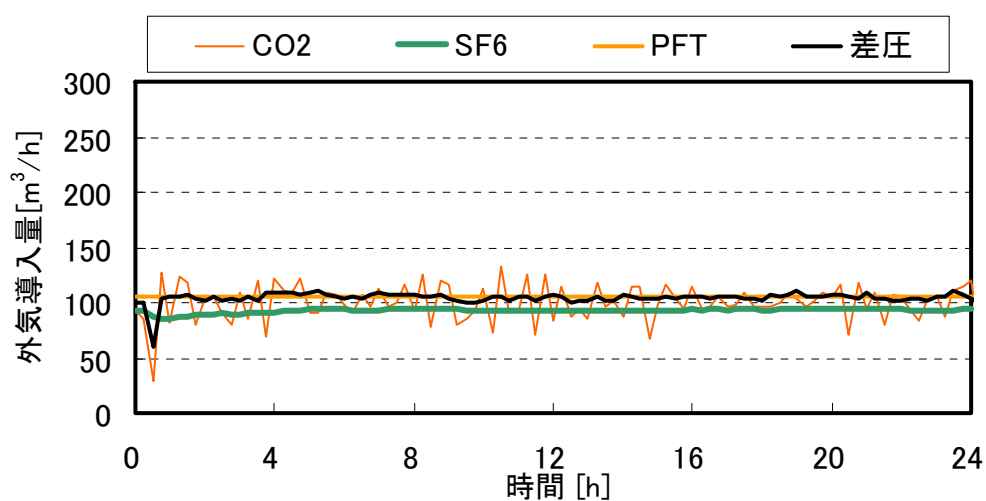


図 4-10 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件 2)

4.4.3 条件3 (0.47 回/h、12 時間北正圧、12 時間南正圧)

条件3の測定結果を図4-11に示す。設定差圧10Paに対し、測定期間中の平均差圧は北正圧12.5Pa、南正圧10.8Paとなった。

外気導入量はSF₆法100 m³/h、CO₂法103 m³/h、差圧法106 m³/h、PFT法が162 m³/hであった。換気回数としてはPFT法を除いた各測定法で0.49～0.51 回/hであった。しかし、PFT法は162 m³/h (0.79 回/h) で他の測定法との差が大きくなった。原因としては、この条件における気中濃度定常到達時間に比べ反転周期が長すぎることを考えられる。条件3のような一定な流れを持つ長周期反転条件下ではPFT法において誤差が生じる事が確認された。詳細については「4.5 PFT法が含む理論誤差」にて考察する。

また、測定4時間目のCO₂法の結果値が大きく変動しているが、原因はその直前にターゲット濃度1500ppmを2回下回りドージング量を増やす動作が行われたがそのために室内濃度が1650ppmまで上昇、その時点でドージング装置がドージング量を大幅に減らしたためである。その直後に外気導入量が多くなっている部分はターゲット濃度とドージング量のバランスを取るためにガスの過剰注入が行われていた。差圧法において、条件3では北正圧と南正圧による外気導入量に差が見られるが、これは北正圧条件において12時間中実験開始0～6時間の間の差圧が設定値より多少大きかったことが原因である。

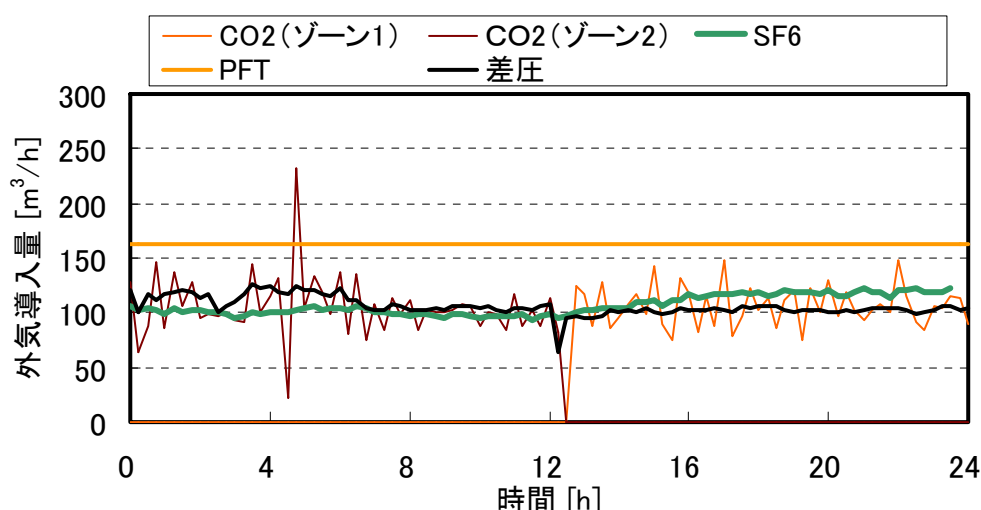


図4-11 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件3)

4.4.4 条件4 (0.47 回/h、2 時間周期に正圧の方向変動)

条件4 の測定結果を図 4-12 に示す。条件4 は換気回数 0.47 回/h、北正圧と南正圧が 2 時間毎に交互する設定である。但し、CO₂ 法は機器の電源に問題が生じ、10 時間の測定となった。その他の測定法は 20 時間測定である。

外気導入量は差圧法 100 m³/h、SF₆ 法 101 m³/h、PFT 法 114 m³/h、CO₂ 法が 118m³/h であった。換気回数としては差圧法と SF₆ 法が 0.49 回/h、PFT 法 0.55 回/h 、CO₂ 法が 0.57 回/h であった。

いずれも差異は少なく比較的短周期の外乱変動条件でも PFT 法は精度良く測定が出来る事が確認された。

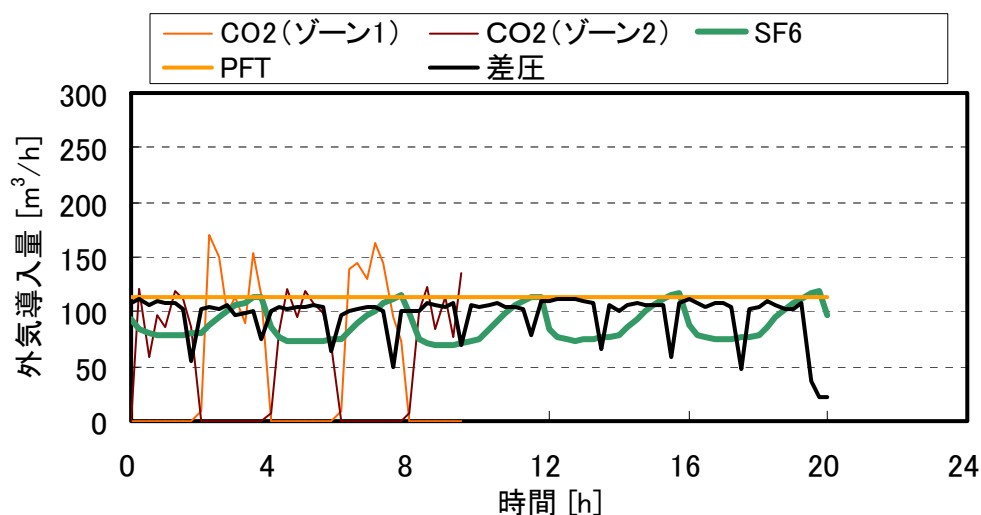


図 4-12 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件4)

4.4.5 各測定法の比較

本研究では換気回路網を用い、差圧から算定した予測データ（差圧法結果）を基準として比較・検討することとした。

差圧法からの結果は条件 1 : 0.83 回/h、条件 2 : 0.51 回/h、条件 3 : 0.51 回/h、条件 4 : 0.49 回/h である。以下で、パーセンテージは差圧法結果値を基準とした外気導入量の差の割合である。PFT 法はそれぞれ 0.83、0.51、0.79、0.55 回/h であり、条件 1、2 は差圧法と一致した。条件 3 においては+53%、条件 4 は+14%の差があった。風向変動条件において大きな結果値が得られたが、その理由については「4.5 PFT 法が含む理論誤差」にて考察する。

SF₆ 法は条件順に 0.76、0.45、0.49、0.49 回/h であった。条件 1、2、3 は差圧法に比べ-8%、-11%、-6%の差があったが、条件 4 は同じ値であった。

CO₂ 法は 0.96、0.49、0.50、0.57 回/h であり、条件 1 が+16%、条件 2 が-5%、条件 3 は-3%、条件 4 においては+18%の差があった。

全条件の結果から差圧法を基準とした場合の偏差（絶対値）の平均は、PFT 法 17% (0.08 回/h)、SF₆ 法 7% (0.04 回/h)、CO₂ 法 10% (0.06 回/h) となった。PFT 法の偏差平均が大きくなったが、これは主に条件 3 の偏差が寄与している。全体的な偏差が最も小さかったのは SF₆ 法であり、条件 3、4 のような気流方向反転条件において最も安定した測定結果となった。CO₂ 法が SF₆ 法より多少大きな外気導入量結果を見せており、バッググラウンド濃度や測定機器の特性による誤差の可能性も考えられる。また、CO₂ は溶水性があり湿度に影響を受けるとされているが、今回の実験では室内の相対湿度が 27~39%と低く湿度による影響は大きくないと考えられる。

4.5 PFT 法が含む理論誤差

気流方向反転条件（条件 3、4）において PFT 実測値と差圧法との差が見られたため、室内空気の完全混合及び圧力方向に一樣な流れが形成されると仮定し、換気回数 0.5 回/h 及び 1.0 回/h において気流方向が反転する条件を与え、1 分間隔で PFT の気中濃度変化を予測した。2 室モデルを作成、室容積はそれぞれ 100m³、完全混合、換気回数 0.5 回/h（外気導入量 100 m³/h）及び 1.0 回/h（外気導入量 200 m³/h）を仮定した。放散量は実験の PFT 放散量と同量の、物質 a : 6820µg/h（ゾーン 1 に放散）、物質 b : 2520µg/h（ゾーン 2 に放散）とした。

気流変動条件としては圧力の方向が 1、2、3、6、12 時間間隔で反転する（但し、1.0 回/h 換気条件では 0.5 時間間隔を追加）。計算の助走時間は 24 時間とした。また、気中濃度変化予測から積算平均気中濃度を求め、その濃度を PFT 法の計算式に代入して外気導入量を算出（以下、PFT 理論外気導入量）した。

図 4-13 に理論気中濃度経時変化のグラフ（換気回数 0.5 回/h、気流反転時間間隔：6、2、1 時間）を示す。

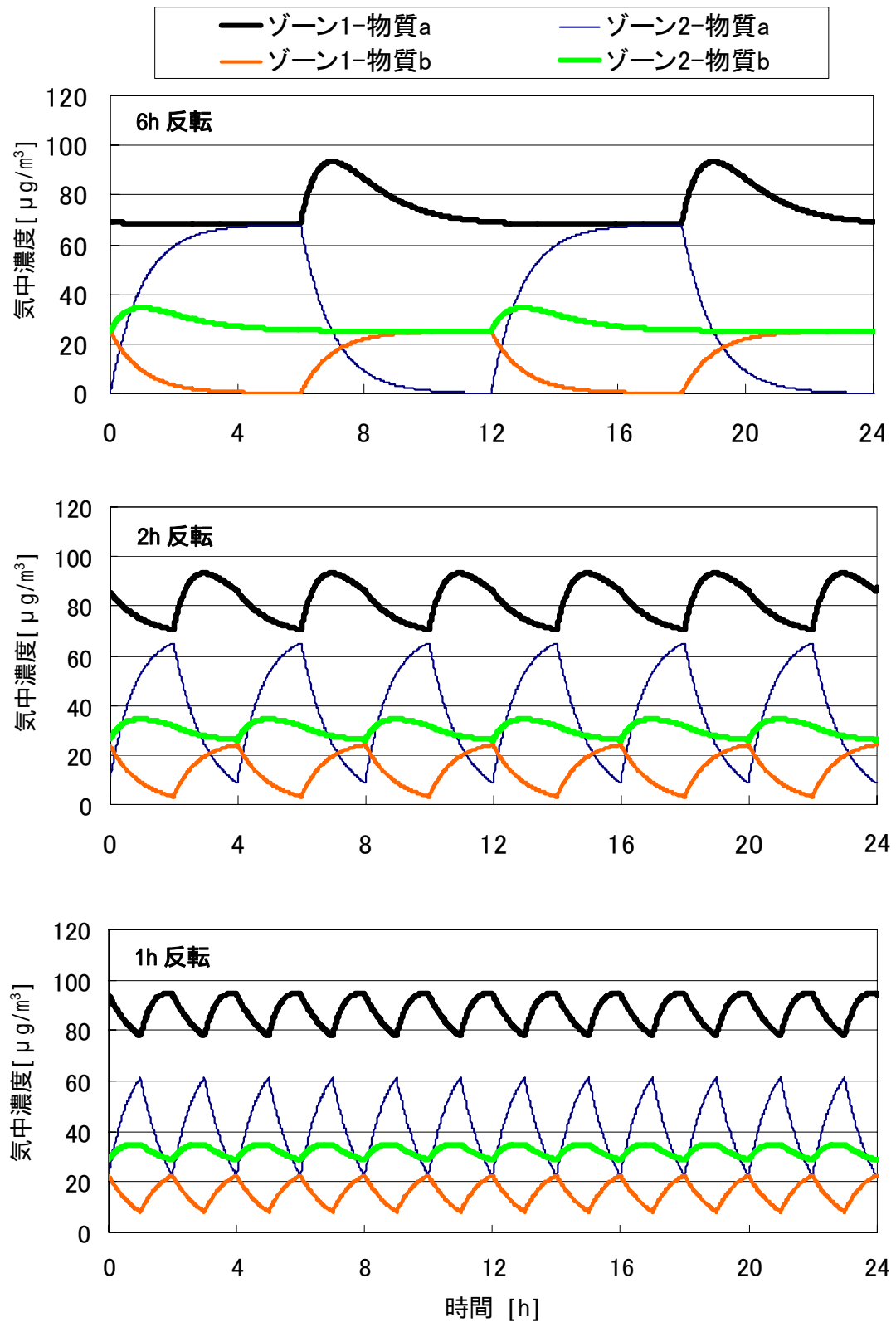


図 4-13 理論気中濃度経時変化 (気流反転時間間隔: 6、2、1 時間)

換気回数 0.5 回/h 条件において、12 時間間隔で反転する条件では外気導入量の初期条件値に比べ PFT 理論外気導入量が 30%大きくなる。6 時間間隔で反転する条件では 26%、3 時間間隔では 20%、2 時間毎に反転する条件では 14%大きい結果となる。このような誤差は反転周期が短くなるにつれ小さくなり、1 時間毎の反転条件では 4%まで誤差が減る計算となった。

図 4-13 の 3 つのグラフから反転周期が長くなるほど気中の平均濃度が下がる事が読み取れる。放散源が設置された室（以下、A 室とする）が風上側である場合は、十分な時間が経過し定常状態に達すると気中濃度はもっとも低くなり、風下側の室（以下、B 室とする）における気中濃度は A 室から流入する物質により A 室の気中濃度と同じ値になる。従って、気流方向の反転が無い場合、PFT 法による換気量測定結果は実質換気量と同じ値になる。

定常状態到達時間に比べ相対的に長い周期で気流方向が反転する場合、放散源が設置されている A 室が風下側の室になり、B 室の物質が流入され A 室の気中濃度が上昇する。しかし、A 室に設置されている放散源から放散されたトレーサーガスは B 室に行き渡らず直接外気に流出してしまう。この時、B 室はトレーサーガスが経由しない純減条件になり、時間が経過するにつれ A 室と B 室を合わせた全体空間における気中濃度は過小評価されることになる。

風下側室の濃度上昇現象は気流反転直後に集中的に発生する。従って、反転周期が短い条件では風下側室の濃度上昇現象が頻繁に生じ、全体的に空間内物質が増えて気中濃度は理論平均値に接近する。

また、図には示さないが、1.0 回/h 換気（外気導入量 200 m³/h）の場合は 0.5 回/h 換気に比べ定常状態到達時間が短くなるため、周期は更に短くならなければならない。計算では 1 時間間隔：13%、2 時間：23%、3 時間：26%、6 時間：30%、12 時間：32%と差の幅が大きくなる。0.5 時間間隔の反転条件では 5%の差となる。

これらの結果から、定常状態到達時間に対する反転周期の相対的な長さによって誤差幅が決まることが分かる。0.5 回/h 換気条件にて定常状態到達時間は約 8～9 時間であるが、それに対し 12 時間間隔の反転（条件 3）は、その変動周期が長すぎることになる。

今回のような、定常状態到達時間に比べ気流方向が長周期を持って反転する場合、PFT 法は気中濃度の測定が正確に行われても事実上外気導入量を過大評価することになる。

4.6 考察

M.H.Sherman^{19) 20)}は実時間測定法 (real-time technique) が積算測定法 (integrated technique) よりよい測定精度が、また単一ガス法 (single-gas technique) よりもマルチガス法 (multigas technique) がよい精度が得られると記述している。本実験における PFT 法は積算測定—マルチガス法である。

また、ISO 16000-8²¹⁾では空気齢を測定する際の各測定法の不確実性について説明している。PFT 法には放散源からの放散量、パッシブサンプラーのサンプリングレート及びサンプラーの空間代表性、溶媒抽出及び GC 分析、ガスの空間内濃度分布などの不確実さから測定の不確実性が存在する。また、SF₆ 法のようなアクティブ法を用いた測定法にはサンプリング及び分析機器の標準偏差、ドージングの制御、ガスの空間内濃度分布などの不確実性要因が存在する。CO₂ 法の場合は湿度依存性、人体発生による影響、高いバックグラウンド濃度から不確実性は SF₆ 法より大きくなることが予想される。ISO 16000-8 の測定例では、SF₆ 一定供給法 4% に対して PFT 連続発生法は 11%と示されており、SF₆ 法が PFT 法より不確実性が少ないと評価している。

本研究における PFT 法については、放散源からの放散量の不確実性と温度変化による誤差は電子天秤による秤量を行ったため 0%と仮定し、サンプリングレートキャリブレーションにおける不確実性は ISO で示している 5%と仮定した。サンプラーが空間内で代表する濃度分布の偏差に関して、ISO では小さな室における一般的な混合条件下で 1 本のサンプラーを用いた時の不確実性を 5%と示しているが、今回の実験では最大換気回数が 1.0 回/h 未満であり、容積の小さな室で攪拌ファンを用いているため完全混合と仮定し 0%とした。また、トレーサーガスの拡散分布については、今回の実験では濃度分布の測定を行っていないため偏差は不明であるが、同理由で瞬時一様拡散と考えた。溶媒抽出及び GC-MS 分析の不確実性は 1μg、10μg 添加回収率試験の計 12 回の分析結果から標準偏差 C₆F₆: 7%、C₇F₈: 14%が算出され、本研究における PFT 法の不確実性は 0.12 (12%) となる。

不確実性評価には以下の式を用いた。

$$S = \sqrt{s_{source}^2 + s_{sampl}^2 + s_{meas}^2 + s_{inhom}^2} \quad \dots\dots (4-6)$$

S _{source}	: 放散源からの放散量の偏差による不確実性
S _{sampl}	: サンプリングの不確実性
S _{meas}	: 溶媒抽出及び分析の偏差による不確実性
S _{inhom}	: 空間におけるガスの均一分布の偏差による不確実性

本研究の PFT 法が ISO 測定例の PFT 法より不確実性が若干大きくなっているが、ISO の測定例では単一種の PFT を用いており、サンプリングレートが小さく、時間当たりの PFT 放散量を少なくして 164 時間の長時間測定を行っている。それに比較して、本論文で用いる PFT 法は 2 種の PFT を使用し、サンプリングレートも約 150~170 倍高く 24 時間測定としていることが異なる。

PFT 法は、ゾーン毎に各物質が定常に近い状態になるよう事前に放散源を設置し、対象空間の換気性状により気中濃度が決まる。また、完全混合を仮定している。しかし、圧力の方向が変わる度に風下側に設置されている物質の放散成分は風上側の室には行き渡らなくなってしまう、空間全体に混合されず排出される。

変動が多く室間で混合がよく行われる場合は換気量に相応する気中濃度が形成される。しかし、気中濃度が下がり切るまで一定気流が維持されてから反転することを繰り返すと、全空間内に滞留する物質の量が少なくなり結果的に気中濃度変動の中心線が低いところで形成される。即ち、空間全体において気中濃度の変動振幅を小さくすることが重要であり、物質濃度が下がり切って、ある空間がその物質に対して外気と同じ条件になってしまう場合はその分、誤差が大きくなる。

全室において空気交換（物質交換）がよく行われれば気中濃度は該当換気条件下での理論気中濃度値に接近し、結果的に実際の換気量に近い結果が得られる。周期変動が定常状態到達時間に比べ長い場合は濃度変動の振幅が大きくなり理論平均濃度より低いところに濃度平均値が形成されるため、PFT 法は換気量を過大評価することになる。

このことから、気流の短周期変動や、不均一な気流が発生して室間での空気交換があり、混合が充分なされる場合は精度に大きな影響を与えずに測定ができると考えられる。

PFT 法は多数室における室間の空気交換量の測定、配管などの逆流による汚染空気の室内進入の特定、病院における空気による院内感染可能性の探索などに有効に利用できる。更に、アクティブ測定法に比べ簡便に測定ができるため現場測定に対応しやすい。但し、今回の実験のような長周期の極端な換気性状が予想される現場の測定には PFT 法の適用に注意する必要がある。

4.7 まとめ

実大実験集合住宅において圧力の大きさと向きを変えた 4 条件の外乱条件を模擬し、3 種類のトレーサーガス法及び差圧測定法を用いて外気導入量測定を行い、PFT 法の精度検証を行った。また、数値計算を通じ、PFT 法が持つ理論誤差について検討を行った。

- 1) 差圧測定結果、換気性状を設定するために行った南北面チャンバー間の圧力差は、ほぼ想定通りの実験条件が具現された。
- 2) 条件 1 において、実測した差圧法の結果は 0.83 回/h となった。CO₂ 法は換気回数 0.96 回/h、PFT 法 0.83 回/h、SF₆ 法は 0.76 回/h となった。
- 3) 条件 2、3、4 では PFT 法の条件 3 を除けば、いずれの測定法でも 0.45～0.57 回/h の換気回数を示し、整合性の高い結果が得られた。4 つの異なる換気量測定法を用いてもほぼ同等な換気量測定が可能であった。PFT 法は条件 3 において 0.79 回/h であり、同条件における他の測定法結果より大きくなった。
- 4) 差圧法を基準とした場合の偏差絶対値の平均は、PFT 法 17% (0.08 回/h)、SF₆ 法 7% (0.04 回/h)、CO₂ 法 10% (0.06 回/h) となった。全体的な偏差が最も小さかったのは SF₆ 法であり、条件 3、4 のような気流方向反転条件において最も安定した測定結果となった。
- 5) PFT 理論外気導入量計算の結果、2 室モデル、0.5 回/h 換気、24 時間予測にて 12 時間周期で気流方向が反転する場合は 30% の誤差が、2 時間周期で反転する場合は 14% の誤差が生じる事が分かった。反転周期が短くなればその誤差も小さくなり、気流の不規則な変動がある空間における換気量測定では誤差が少なくなると予想された。
- 6) 本実験に用いた PFT 法の測定における不確実性は 0.12 (12%) であった。
- 7) 現行の PFT 法は気流方向が一定周期で反転する換気性状下では実際より大きく換気量を評価する可能性があるが、定常状態到達時間に比べ相対的に短い周期変動や不均一な気流が発生して室内での混合と室間流動が充分ある場合は、精度に大きな影響を与えずに測定ができると考えられる。特殊な条件を除けば PFT 法は現場における簡便かつ実用性の高い室間空気交換量及び平均換気量測定法として利用出来ることが示された。

【参考文献】

- 1) W.J. Fisk, D. Faulkner, and A.T. Hodgson : The pollutant control index : a new method of characterizing ventilation in commercial buildings, Proceedings of Indoor Air '93, Vol.5, pp.9-14., 1993
- 2) Hans Stymne and Anita Eliasson : Development of a new PFT-method for ventilation rate measurements, NBS-I, The Development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.37-48, 1991
- 3) Jorma O. Säteri : The measurement of ventilation using integrating tracer techniques, NBS-I, The development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.11-32, 1991
- 4) J. Sateri, A. Majanen : The evaluation of field measurements of ventilation parameters made using the passive perfluorocarbon method, Clima 2000, Vol.1, pp.282-289, 2000
- 5) Russell N. Dietz and Edgar A. Cote : Air infiltration measurement in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, Environment International, Vol. 8, pp. 419-433, 1982
- 6) Seiichi Tabuchi, Marina Asai, Satoshi Sakai, Noriko Marumoto and Shin-ichi Tanabe : Application of a simple method for detection and quantifying VOC sources, Proceedings of Roomvent 2004, Indoor Air Quality, CD-ROM, 2004
- 7) 田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、吉田和之、柏原誠一、田辺新一 : パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 19 PFT 法を用いた換気量簡易測定法検討実測、日本建築学会大会学術講演 概要集、D-2、pp.913-914、2005
- 8) 服部将志、田中祐輔、窪田圭佑、金勲、田辺新一、柏原誠一、吉田和之 : パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 23 戸建住宅における PFT 法、CO₂ 一定濃度法、SF₆ 一定濃度法、風量測定法を用いた換気量測定の比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.921-922、2006
- 9) 柏原誠一、松田克己、吉田和之、今井秀秋、田辺新一 : パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その24 戸建住宅実測におけるPFT 法の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.923-924、2006
- 10) 金勲、李晟在、成旻起、田辺新一 : パッシブ測定法を用いた韓国新築集合住宅の室内空気質調査、日本建築学会環境系論文集、第 608 号、pp.31-38、2006
- 11) 空気調和・衛生工学会 : 室内換気効率の現場測定法・同解説、空気調和・衛生工学会規格、2002
- 12) 空気調和・衛生工学会 : トレーサーガスをを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工学会規格、2004
- 13) Peter W. Grieve : Measuring ventilation using tracer-gas, Brüel & Kjær, 1989
- 14) 佐藤健一、澤地孝男、梅干野晃 : 集合住宅用ハイブリッド換気システムの風力換気挙動に関する換気回路網モデルと検証、日本建築学会環境系論文集、第 591 号、pp.15-22、2005
- 15) 中川徹 : 最小二乗法による実験データ解析、東京大学出版会、1982
- 16) 田島稔、小牧和雄 : 最小二乗法と測量網平均の基礎、東洋書店、2001
- 17) S.L. Miller, K. Leiserson and W.W. Nazaroff : Nonlinear least-squares minimization applied to tracer gas decay for determining airflow rates in a two-zone building, Indoor Air 1997, Vol.7, pp. 64-75,

1997

- 18) 柏原誠一、吉田和之、田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その18 CO₂一定濃度法を用いた戸建住宅実測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.911-912、2005
- 29) M.H.Sherman : Uncertainty in air flow calculations using tracer gas measurements, LBL-25415, Lawrence Berkeley Laboratory, 1988
- 20) M.H.Sherman : On estimation of multizone ventilation rates from tracer-gas measurements, LBL-25772, Lawrence Berkeley Laboratory, 1988
- 21) ISO : Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions, ISO 16000-8, 2007

第5章

多数室を有する戸建住宅における 換気量測定

第5章 多数室を有する戸建住宅における換気量測定

5.1 背景と目的

1970年代の2回に渡るオイルショックにより、日本では1979年6月「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（旧省エネルギー基準）が制定され、1999年3月には次世代省エネ基準が改正・告示された。更に、2006年4月には改正省エネルギー法が施行された。

それに伴い、省エネ技術が向上、高気密・高断熱の建築物が増加した。住宅の高気密化による換気量の減少と新建材の使用増加、生活パターンの変化などから、室内における化学物質汚染が問題となった。これは、シックハウス症候群（Sick House Syndrome）と呼ばれる症状としてよく知られている。そのため、2003年7月には改正された建築基準法により、必要換気量の確保のため換気設備の設置が義務化された。

改正建築基準法施行以降、新築住宅において多様な方式の機械換気設備が導入されているが、その運用状況や住宅に設置された後の実際の換気性能について把握することは重要である。

そこで、本論文では実住宅や作業現場における換気状況を簡便に測定することを目的としてPFT法（Perfluorocarbon Tracergas Technique）^{1)~8)}を用いた換気量測定法の開発及び改良を行い、本章では他のトレーサーガス法^{1) 15) 16)}との精度比較と共に実住宅における換気性能を把握することを目的として現場実測を行った。

測定対象は、2階建戸建住宅（第1種換気）^{9) 10)}、同一分譲地区内の新築戸建住宅（第1種換気）^{11) 12) 13)}、工業地域の集合住宅（第3種ハイブリッド換気）¹⁴⁾、3階建戸建住宅（2種類の第3種セントラル換気）^{17)~22)}であり、各換気システムの稼働条件、自然換気との組み合わせ条件などの換気条件を変化させ、PFT換気量測定法とSF₆、CO₂トレーサーガス法、風量測定法を用いて同時に測定し、比較検討した。表5-1に各実測における換気量実測の目的及び概要をまとめる。

表 5-1 各実測における目的及び概要

実測対象	実測目的	実測条件		測定内容
2 階建戸建住宅 (第 1 種換気)	・ PFT 物質の組み合わせの実測結果への影響	条件Ⅰ		・ 住戸全体を 1 つのゾーンとして C_6F_6 を放散 ・ SF_6 濃度減衰法 ・ CO_2 一定濃度法 ・ 風量測定
		条件Ⅱ		・ ZONE1 に C_6F_6 、ZONE 2 に C_7F_8 及び C_7F_{14} を放散
同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸 (第 1 種換気)	・ PFT 換気量測定法の精度検証 ・ 第 1 種換気システムの換気性能	住宅 A	自然換気 第 1 種換気	・ ZONE 1、2、3 に C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} を放散 ・ SF_6 一定濃度法 ・ CO_2 一定濃度法 ・ 風量測定
		住宅 B	第 1 種換気	・ 住戸を 2 つのゾーンに分け ZONE 1 に C_6F_6 、ZONE 2 に C_7F_{14} を放散
工業地域の集合住宅 (第 3 種ハイブリッド換気)	・ 第 3 種ハイブリッド換気システム設置住宅の換気実態把握	1 次実測	ハイブリッド換気 自然換気 常時第 3 種換気	・ PFT 一定濃度法 (ZONE 1、2、3 に C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} を放散)
	・ 換気システムの 1 年後の換気性能変化、PFT 法と他のトレーサガス法との比較	2 次実測	ハイブリッド換気 常時第 3 種換気 自然換気	・ PFT 一定発生法 (ZONE 1、2、3 に C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} を放散) ・ SF_6 一定濃度法 ・ CO_2 一定濃度法
3 階建戸建住宅 (M 社製及び G 社製の第 3 種セントラル式換気システム)	・ 縦方向のゾーン分けへの適用及び精度確認 ・ 第 3 種セントラル式換気システム 2 種類の換気性能比較	1 次実測	M 社製第 3 種換気 M 社製第 3 種換気システム停止 - 1、2 階の排気ファン稼働 G 社製第 3 種換気 自然換気	・ PFT 一定発生法 (C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14}) ・ CO_2 一定濃度法 ・ 風量測定
		2 次実測	M 社製第 3 種換気 G 社製第 3 種換気	・ PFT 一定発生法 (C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14}) ・ 風量測定

5.2 測定法概要

本章では PFT 一定濃度法、SF₆ 一定濃度法及び濃度減衰法、CO₂ 一定濃度法、風量測定法の 4 種類の換気量測定法¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を用いた。また、風速・風向などの外乱測定及び温湿度測定を行った。各測定法の概要について以下に説明する。

但し、各実測毎に換気量測定法の設定条件や組み合わせに変更があるため、各実測の測定概要で更に詳細を説明する。

5.2.1 温湿度測定

自然換気は外部での風力のみではなく、室内と外気の温度差によっても生じる。また、PFT 法において、PFT の放散量とサンプリングレートは温度によって変化するため、PFT 放散源及びサンプラー周辺の温湿度を測定する。計測には図 5-1 に示すメモリー式温湿度計（TABAI Espec RS-11）を用いた。



図 5-1 メモリー式温湿度計

5.2.2 PFT 法を用いた換気量測定法

PFT (Perfluorocarbon Tracergas) 法^{1)~8)}を用いた換気量測定法では、トレーサーガスとして C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} 用いて測定を行う。シリコンを放散膜として使用したクリンプバイアル PFT 放散源を作製し、バイアルに液体の PFCs (Perfluorocarbons) を充填する。クリンプバイアルを用いた PFT 放散源の概要を図 5-2 に示す。

また、PFT を捕集するサンプラーとして、パッシブガスチューブ²³⁾を使用する。各サンプラー概要図を図 5-3 に示す。

パッシブサンプラー²⁴⁾は回収後、溶媒抽出し GC/MS により定性定量を行う²⁵⁾²⁶⁾。

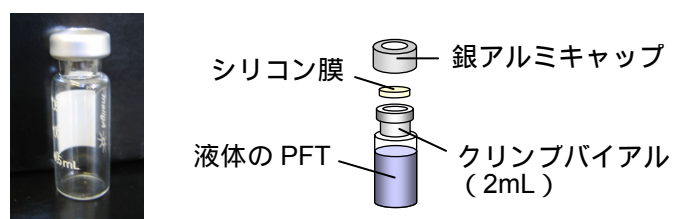
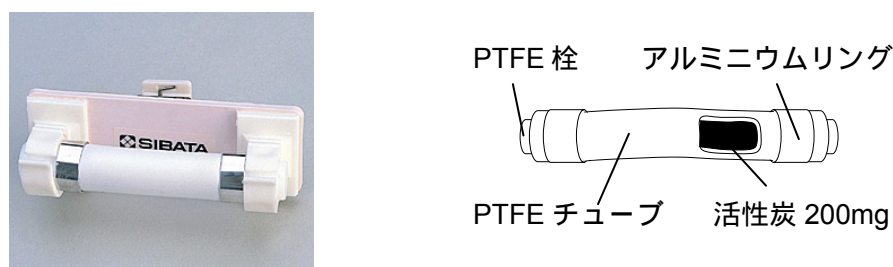


図 5-2 バイアルを用いた PFT 放散源概要図



パッシブガスチューブ

図 5-3 サンプラー概要図

PFT 法による換気量測定は、住戸をゾーン分けし、それぞれ異なる PFCs 物質の PFT 放散源を設置する。同一ゾーンでは同一物質のみ放散させる。 C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} の 3 物質を用いることができるため、ゾーンは最大 3 つまで設定することが可能である。

放散量に関しては、サンプリングレートの気中濃度による依存性を少なくするため、測定の際には気中濃度を予め予測し、サンプリングレート試験から精度が確保できる気中濃度範囲 (C_6F_6 : $0 \sim 430 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 C_7F_8 : $0 \sim 255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 C_7F_{14} : $0 \sim 121 \mu\text{g}/\text{m}^3$) に入るよう PFT 放散量を調整する。

放散量の調節には、1.0mm 厚及び 5.0mm 厚のシリコン膜を放散膜として用いる。また、更に放散量を調整する必要がある場合はアルミ板に直径 3.0mm の穴を開け、シリコン膜の上下に置いた放散源を用いる。

5.2.3 SF₆を用いた換気量測定法

マルチガスモニター（B&K1302）及びドーザー&サンプラー（B&K1303）を用いてトレーサーガスのドーピング量と気中濃度を測定する^{1) 16)}。SF₆ 気中濃度を一定濃度にするため、ドーピング量を変化させる一定濃度法、或いは SF₆ の気中濃度の減衰率をモニタリングして換気量を算定する濃度減衰法を用いる。マルチガスモニター及び測定風景を図 5-4 に示す。



測定機器（B&K1302, 1303）

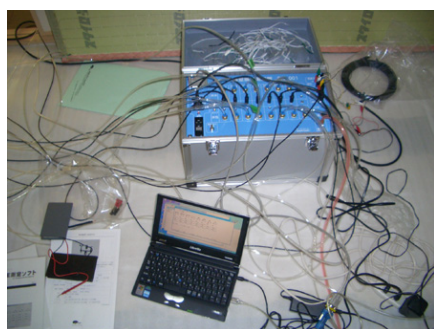


測定風景

図 5-4 マルチガスモニター及び測定風景

5.2.4 CO₂を用いた換気量測定法

多数室換気測定器（SK-001、コーナー札幌社製）を用い、トレーサーガスとしては CO₂ を放散させる。一定濃度法及び濃度減衰法によって換気量を算出可能であるが、本章では一定濃度法を用いた^{1) 15)}。NDIR（非分散赤外線分析法）を採択した測定器であり、CO₂ の濃度は 0～5000ppm の範囲内で測定を行うことができる。8 点の CO₂ 濃度を順次的に計測することができる。多数室換気測定器及び測定風景を図 5-5 に示す。



多数室換気測定器



ドーピング及びサンプリング

図 5-5 多数室換気測定器及び測定風景

5.2.5 風量測定による換気量測定法

風量測定¹⁵⁾には換気口（給気口、排気口）に直接密着して測定を行うことができる風量測定器（KNS-300）を用いた。風量測定器及び設置風景を図 5-6 に示す。



風量測定器



測定風景

図 5-6 風量測定器及び測定風景

5.2.6 風速・風向測定

室内の換気量は外部風速及び風向に依存するため、外乱の測定を行った。図 5-7 に示す気象観測機器を外部に設置し、温度・湿度・風速・風向を計測した。



気象観測機器本体
(ヴァンテージプロ)



風向・風速計



コンソール
(データロガー)



測定風景

図 5-7 気象観測機器設置風景

5.3 2階建戸建住宅における換気量測定

5.3.1 目的

PFT法を用いた換気量測定法では基本的にゾーンを3つに分け、ゾーン間の空気交換量を測定できるとしているが、トレーサーガスとして用いる C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} 各物質の組み合わせ条件が測定結果に影響を及ぼすかについて検討を行った⁹⁾¹⁰⁾。

本実測では、PFT法を用いた換気量測定において、条件Ⅰと条件Ⅱの2つの測定条件を設けた。条件Ⅰは住宅全体を1ゾーンとして扱い、PFT法を単一トレーサーガス法とした。条件Ⅱでは1階をZONE1、2階をZONE2とし、ZONE1に C_6F_6 を、ZONE2に C_7F_8 及び C_7F_{14} の放散源を設置し、 $C_6F_6-C_7F_8$ と $C_6F_6-C_7F_{14}$ の組み合わせ条件下で測定を行った。

PFT一定発生法、 SF_6 濃度減衰法、 CO_2 一定濃度法及び風量測定法の4種の換気量測定法を用いて換気性能の検証とPFT法の精度検証を行った。

また、測定対象住宅に設置されている第1種換気システムは、給気と排気を同時に制御する方式で換気量確保に対する信頼性が高く、制御性がよいため、設置例が増加している。

しかし、仕様上の設計換気量に対して実際の住宅に適用した際、どの程度の換気性能を確保することができるのか検証された例は少ない。

換気条件としては、第1種換気条件及び換気設備を停止した自然換気条件とした。

5.3.2 実測概要

神奈川県川崎市に立地する戸建住宅を対象住宅とした。対象住宅は2004年3月に竣工し、未入居で8ヶ月が経過していた。断熱性能は次世代省エネ基準に適合しており、気密性は本実測で測定した。また、この住宅には第1種換気システムが備えられている。

実測期間は11月8日～11月16日とした。表5-2に実測スケジュール、図5-8に対象住宅外観及び平面図を、また対象住宅の室面積及び室容積を表5-3に示す。

本実測では、PFT法を用いた測定、SF₆を用いた測定、CO₂を用いた測定及び給気口の風量測定の4種類の換気量測定法を用いた。また、測定時には住宅の開口部は閉めきった状態とした。

表5-2 2階建戸建住宅の実測タイムスケジュール

	11/8		11/9		11/10		11/11		11/12	
	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm
気密測定			測定 ↔							
PFT法							PFT放散源設置&養生 ← PFT法 サンプラー設置 →		PFT放散源設置&養生 ←	
SF ₆ 法							CO ₂ 一定濃度法(欠測)		CO ₂ 濃度減衰法 →	
CO ₂ 法			機器設置 ← CO ₂ 法 測定 →				CO ₂ 法 測定 ← →			
風量測定			測定 ↔							
外乱測定					機器設置 ← →				測定	
	11/15		11/16							
	am	pm	am	pm						
気密測定										
PFT法	PFT放散源養生 ←			→						
		PFT法 サンプラー設置 ← →								
SF ₆ 法										
CO ₂ 法										
風量測定										
外乱測定		測定 →								

※) CO₂法 : 住宅の部屋を閉め切り、多数室での測定

CO₂法 : 住宅の部屋をオープンにして、住宅全体を1ゾーンとした測定

PFT法 : 住宅全体を1ゾーンとして測定

PFT法 : 住宅を1階と2階の2ゾーンに分けて測定

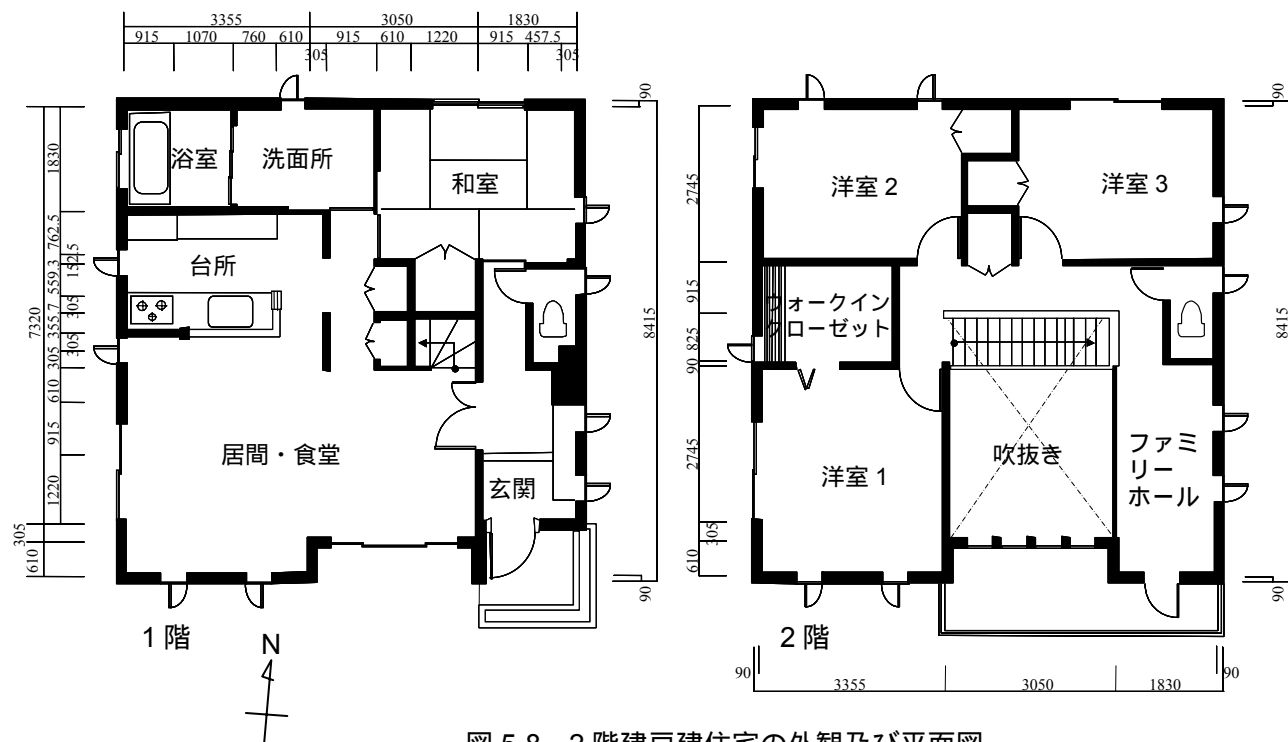


図 5-8 2階建戸建住宅の外観及び平面図

表 5-3 実測対象住宅の室面積及び室容積

		床面積 [m ²]	室容積 [m ³]
1 階	居間・食堂・吹き抜け	26.14	115.8
	和室	10.04	24.1
	洗面所	8.38	20.1
2 階	洋室 1	12.29	29.5
	洋室 2	10.04	24.1
	洋室 3	10.04	24.1
	Family Hall	6.71	16.1
R 階		4.47	10.7
Zone1 (1 階)		64.28	154.3
Zone2 (2 階)		65.95	158.3
住宅全体		134.70	323.3

5.3.3 測定法概要

表 5-4 に各測定機器及び測定条件を、また各測定項目のドーピングポイント及びサンプリングポイント、測定点を図 5-9 に示す。

測定法としては、換気量測定法として PFT 一定発生法、SF₆ 濃度減衰法、CO₂ 一定濃度法及び風量測定法の 4 種類、風向・風速測定、温湿度測定を行った。測定法の詳細に関しては本章「5.2 測定法概要」にて説明している。

本実測では、空間全体に対してドーピングポイントの数が少なく、室内で濃度分布が生じることが予想されたため、居間・洗面所・和室・洋室 1・洋室 2・洋室 3・Family Hall に攪拌ファンを設置し、さらに吹抜け上部に設置されたシーリングファンを稼働させ、1 階から 2 階に充分に空気が移動するようにした。

CO₂ 法では 7 点のドーピング及びサンプリングポイントを設定し測定を行った。居室間のドアを閉め、居室毎の換気量を求める条件を CO₂ 法 I とし、居室間のドアを開放して、住宅全体を 1 ゾーンとして換気量を求める条件を CO₂ 法 II とした。

SF₆ はドーピングポイントを居間の一箇所にし、住戸全体での濃度減衰を計測して換気量を算定した。

PFT 法 I では全住宅を 1 ゾーンとし、PFT 法も単一トレーサーガス法 (Single-tracergas Method) として C₆F₆ を全住戸内に放散させて測定を行った。

PFT 法 II では 1 階を ZONE 1、2 階を ZONE 2 とし、ZONE 1 に C₆F₆ を、ZONE 2 に C₇F₈ 及び C₇F₁₄ の放散源を設置した。

表 5-4 測定機器及び測定条件

内容			項目
外乱測定			気象観測機器（AOR 社製 ヴァンテージプロ） 風向・風速、温湿度
温湿度測定			メモリー式温湿度計 （TABAI ESPEC THERMO RECORDER RS-11） 室内（居間・食堂、和室、洋室3室、ファミリーホール）及び外気を測定する
換気量 測定	PFT 法 （簡易一定発生法）	Tracer gas	ZONE 1：C ₆ F ₆ , ZONE 2：C ₇ F ₈ , C ₇ F ₁₄
		放散源	クリンプバイアル瓶（ZONE1） （シリコン膜厚さ= C ₆ F ₆ ：1.5mm, C ₇ F ₈ ：1.0mm, C ₇ F ₁₄ ：1.0mm）
		放散量計量	電子天秤（AandD 社製 GR-300）
		サンプラー	SHIBATA パッシブガスチューブ （捕集剤：粒状活性炭 20～40mesh）
	SF ₆ 法 （濃度減衰法）	Tracer gas	SF ₆
		測定機器	Multi-Gas Monitor（B&K1302） Doser & Sampler（B&K1303）
	CO ₂ 法 （一定濃度法）	Tracer gas	CO ₂ （ターゲット濃度：2000ppm）
		測定機器	多数室換気測定器（コーナー札幌社製 SK-001）
	風量測定法	測定機器	風量測定器（コーナー札幌社製 KNS-300） 各換気口の風量を直接測定

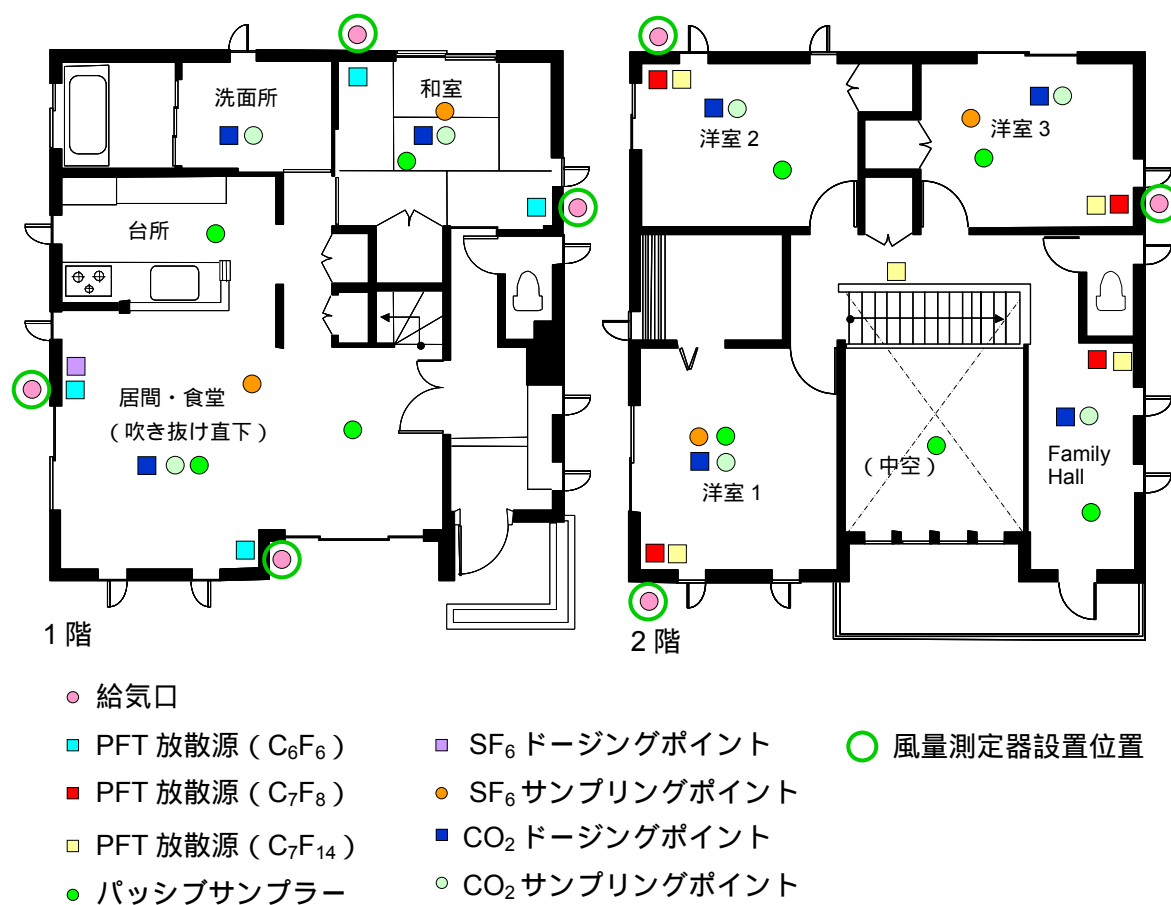


図 5-9 各測定項目の設置点

5.3.4 測定結果

(1) 温湿度及び風向・風速測定

外気の温湿度は気象観測機器、室内の測定点に関してはメモリー式温湿度計を用いて測定を行った。表 5-5 に各点における測定期間中の温度及び湿度測定結果を示す。

一日中、室内測定点における温度分布はほとんどなく、測定期間中の 11 月 12 日までは室内平均温度 $20\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 、11 月 15 日からは $14.5\pm1.0^{\circ}\text{C}$ であった。室内温度は常に外気温を 3°C 程度上回った。また、相対湿度は測定期間中に降雨があったため高くなった。

表 5-5 温湿度測定結果（各点平均温度・平均湿度）

測定日		11/11		11/12		11/15		11/16	
測定項目		温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
		[$^{\circ}\text{C}$]	[%RH]	[$^{\circ}\text{C}$]	[%RH]	[$^{\circ}\text{C}$]	[%RH]	[$^{\circ}\text{C}$]	[%RH]
外気		16.6	79	16.0	90	11.4	88	11.7	74
サン プ ラ ー 近 傍	居間	20.4	69	19.6	74	14.9	70	15.3	65
	和室	19.9	72	19.4	75	14.6	72	14.0	70
	台所	19.8	70	19.3	73	14.7	70	14.6	67
	吹抜け直下	20.3	62	19.6	65	14.9	73	17.3	66
	吹抜け中空	-	-	-	-	-	-	-	-
	洋室 1	20.0	69	19.4	73	14.7	70	14.2	67
	洋室 2	19.8	71	19.1	74	14.4	69	13.7	64
	洋室 3	19.5	72	19.3	74	14.5	71	13.6	70
	Family Hall	20.0	71	19.3	74	14.5	71	14.3	68
P L T 放 散 源 近 傍	居間	20.5	69	19.7	74	14.9	71	14.8	67
	居間	20.2	74	19.3	80	14.5	77	14.5	72
	和室	20.1	78	19.5	82	14.7	79	14.1	76
	和室	19.9	72	19.3	75	14.8	72	14.2	69
	洋室 1	20.1	71	19.4	75	14.5	73	14.3	70
	洋室 2	19.9	73	19.3	77	14.5	74	13.9	71
	洋室 3	19.8	71	19.3	75	14.4	73	13.6	70
	Family Hall	19.9	69	19.4	73	14.6	69	14.2	68

各測定期間中、全体的には部風が吹いており、強い風が観測あれることは無かった。PFT 法の測定期間において、風速 1.8m/s が 2 回、2.2m/s が 1 回観測された以外、実測期間中の屋外風速は静穏であった。また、風向頻度分布より、各測定期間中の風向は、北もしくは北北西に集中していたことが分かった。

(2) 気密測定

IBEC（(財) 建築環境・省エネルギー機構）が定める基準値では、川崎市はⅣ地域に区分され、C 値 5.0 [cm^2/m^2] 以下である場合高気密住宅となる。

この住宅の気密測定を行った結果、C 値は 4.14 [cm^2/m^2] となり高気密住宅であった。

(3) 風量測定

風量測定器（KNS-300、コーナー札幌社製）を用い、給気口・排気口及び換気口に直接装着して風量測定を行った。測定は 10:30 及び 12:30 に、計 2 回行った。各測定点及び給気・排気の合計を表 5-6 に示す。

表 5-6 風量測定結果 [m^3/h]

測定場所	給気・排気	1 回目 (10:30 測定)	2 回目 (12:30 測定)
居間	給気	15	15
居間	給気	17	19
和室	給気	16	17
和室	給気	15	17
トイレ 1 階	排気	43	41
浴室	排気	88	92
洋室	給気	15	17
洋室	給気	15	18
洋室	給気	14	17
トイレ 2 階	排気	43	42
Family Hall	排気	40	45
全体	給気 (140)	107	120
	排気 (190)	214	220

括弧 () 内の数字は設計風量である。

各測定点において、2 回目の測定結果が 1 回目を上回った。また、トイレにおいて 1 回目測定の際に、1 階及び 2 階のトイレのドアを閉めて測定したところ、それぞれ 39、41 [m^3/h] となり、ドア開放時を下回った。さらに、給気口の設計風量は 20 [m^3/h] であったことから、設計風量より若干少ない給気量であった。

住宅全体としては排気量が給気量を上回り、本住宅に備えられている第 1 種換気システムは、排気力が優勢であると考えられる。給気及び排気量から、換気回数を算出した結果、給気では設計換気回数を下回り、排気では上回った。排気量からの換気回数には住宅の隙間からの給気も含まれるため、実際の換気量に近いと考えられるが、排気箇所が主に浴室や便所であるため、排気口付近でショートサーキットが起る可能性も考えられる。

そのため、給気口や排気口の風量測定のみでは、実際にどれくらいの換気が行われているのかを正確に把握することは難しい。

(4) CO₂一定濃度法

CO₂法では7点のドージング及びサンプリングポイントを設定し測定を行った。居室間のドアを閉め、居室毎の換気量を求める条件をCO₂法Ⅱとし、居室間のドアを開放して、住宅全体を1ゾーンとして換気量を求める条件をCO₂法Ⅰとした。以下にそれぞれの条件における結果を示す。

(a) CO₂法

各室における室容積、平均換気量（外気導入量）、換気回数を表5-7に示す。平均換気量の算出を行った測定期間は11月9日21:00～11月10日9:00までの12時間とした。

表5-7 各室における換気量算出結果（CO₂法Ⅱ）

	容積 [m ³]	平均換気量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
居間・台所・吹抜け	115.8	97.9	0.85
洗面所	20.1	16.8	0.83
和室	24.1	19.8	0.82
洋室1	29.5	15.3	0.52
洋室2	24.1	15.9	0.66
洋室3	24.1	27.8	1.15
Family Hall	16.1	11.6	0.72
測定室以外	69.5	-	-
住宅全体	323.3	205.2	0.63

住宅全体では0.63回/hの換気が行われ、換気回数0.5回/hを超えたことから、住宅内の各室間のドアを閉めきった条件でも、必要換気量が確保できることが分かった。

(b) CO₂法

各居室間のドアを開放し、住宅全体を1ゾーンとした際の各居室における容積、換気量（新鮮外気導入量）、換気回数を表5-8に示す。CO₂法Ⅱの平均換気量算出期間は11月11日21:00～11月12日8:40までの11時間40分とした。

表5-8 各室における換気量算出結果（CO₂法）

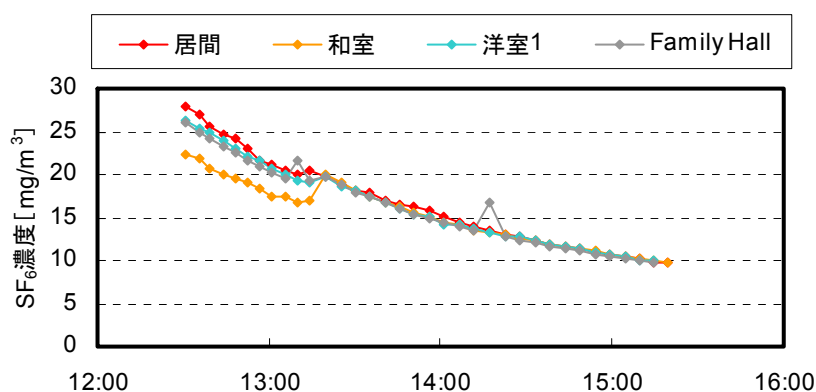
	容積 [m ³]	平均換気量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
居間・台所・吹抜け	115.8	66.3	0.57
洗面所	20.1	19.6	0.98
和室	24.1	29.8	1.23
洋室1	29.5	28.5	0.97
洋室2	24.1	22.2	0.92
洋室3	24.1	23.9	0.99
Family Hall	16.1	13.8	0.85
測定室以外	69.5	-	-
住宅全体	323.3	203.9	0.63

CO₂法Ⅰと同様に、測定期間中の各室の換気量は比較的安定していた。測定室間のドアを閉めきったCO₂法Ⅰより換気回数の少なかった室は居間と洋室3であり、特に居間では約0.3回/h低かった。しかしながら、CO₂法ⅠとCO₂法Ⅱによる住宅全体における換気回数に差は見られなかった。

このことから、室内のドアを閉めきった場合は相対的に排気箇所との圧力損失が少ない居間から外気が流入されやすくなるのに対し、ドアを開放した場合は、他の部屋も同等な圧力損失条件となるため居間への外気導入量が少なくなり、他の室からの外気導入量が増えると考えられる。

(5) SF₆濃度減衰法

11月10日の午後からSF₆のドーピングを開始したが、11日16:00から12日10:00まで電源の不具合で欠測となった。そのため、12日12:00より濃度減衰法（Step-down Method：ステップダウン法）を用いて換気量測定を行った。サンプリングポイントである居間・和室・洋室1・Family HallにおけるSF₆濃度変化を図5-10に示す。

図5-10 ステップダウン法によるSF₆濃度変化

各測定点の濃度が減衰し、13時以降から住宅全体のSF₆濃度が一様になった。そこで、換気量は13:30～15:00までの1時間30分間の測定値から算定した。居間・和室・洋室1・Family Hallにおける換気回数算出結果を表5-9に示す。

表5-9 SF₆濃度減衰法による換気回数算出結果

測定箇所	換気回数 [回/h]
居間	0.46
和室	0.44
洋室 1	0.43
Family Hall	0.45
平均	0.45

各測定室での換気回数結果に差は見られなかった。CO₂法は12時間測定の平均値であり、SF₆法は1時間30分間の結果であるため単純比較は難しいが、CO₂法の住宅全体の換気回数結果と比較すると、換気量が少ない結果となった。

(6) PFT 一定発生法

PFT 法を用いた換気量測定では、住宅全体を 1 ゾーンとした条件（PFT 法Ⅰ）と、1 階を ZONE 1、2 階を ZONE 2 に分け、住宅を 2 ゾーンとした条件（PFT 法Ⅱ）の 2 条件で実測を行った。また、PFT 法Ⅰ、PFT 法Ⅱ両実測において、通常の使用状況に近づけるため、洗面所のドアは閉めた状態とした。

(a) PFT 法

住宅を 1 ゾーンと考えるため、使用する PFT は C_6F_6 の 1 種類のみとした。 SF_6 による換気量測定と同時に行ったため、攪拌ファンを稼動しており、住宅内の空気は一様瞬時拡散と仮定する。表 5-10 に C_6F_6 放散量及び各測定点での PFT 捕集量、気中濃度を示す。

表 5-10 PFT 放散量及び測定結果（PFT 法Ⅰ）

	C_6F_6 放散量 [g]		捕集量 [μg]	気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
居間	居間	0.1856	16.4	346.2
	居間	0.1849		
和室	和室	0.2515	20.8	439.1
	和室	0.2699		
台所	-		12.3	259.7
吹抜け直下	-		19.7	415.9
吹抜け中空	-		19.3	407.5
洋室 1	0.1834		23.0	485.6
洋室 2	0.2362		23.8	502.5
洋室 3	0.1764		20.0	422.2
Family Hall	0.2260		19.8	418.0
合計	1.7139		-	-
平均			19.3	407.4

台所の気中濃度が他の室に比べて低い結果となったが、他の室においては気中濃度の差は大きくなかった。住戸全体の平均気中濃度が $407.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、換気量 $175.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、換気回数は 0.54 回/h となった。

また、各測定室で放散した C_6F_6 の放散量と気中濃度の関係より、測定室毎の換気量を算定した結果を表 5-11 示す。

表 5-11 測定室毎の換気量算定結果 (PFT 法 I)

	気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
居間	346.2	62.8	0.68
和室	439.1	35.2	1.46
洋室 1	485.6	15.8	0.53
洋室 2	502.5	19.6	0.81
洋室 3	422.2	17.4	0.72
Family Hall	418.0	22.6	1.40
住宅全体	-	173.3	0.54

表 5-11 より、PFT 法 I での住宅全体の換気回数は 0.54 回/h となった。

同一期間に行った測定は SF_6 法、 CO_2 法 II、PFT 法 I である。 SF_6 法は測定期間が短く、ドーピングポイント・サンプリングポイント数が少なかったこともあり単純比較は難しいが、各測定法結果から見ると、 CO_2 法 II (0.63 回/h) > PFT 法 I (0.54 回/h) > SF_6 法 (0.45 回/h) となった。

(b) PFT 法

住宅を1階（ZONE 1）と2階（ZONE 2）の2ゾーンに分け、ZONE 1ではC₆F₆を、ZONE 2ではC₇F₈及びC₇F₁₄を放散させた。C₆F₆－C₇F₈による結果とC₆F₆－C₇F₁₄による結果を比較することで、PFTsの組み合わせによる測定結果への影響を調べた。

表 5-12 に PFT 放散量を、表 5-13 に PFT のサンプラー捕集量及び気中濃度算定結果を示す。

表 5-12 PFT 放散量（PFT 法、単位：[g]）

	C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄
居間	0.1944		
居間	0.1862		
和室	0.1373		
和室	0.1215		
洋室 1		0.0694	0.0096
洋室 2		0.0677	0.0122
洋室 3		0.0617	0.0118
Family Hall		0.0717	0.0087
2 階廊下			0.0923
合計放散量 [g]	0.6394	0.2705	0.1346

表 5-13 PFT 捕集量及び気中濃度（PFT 法）

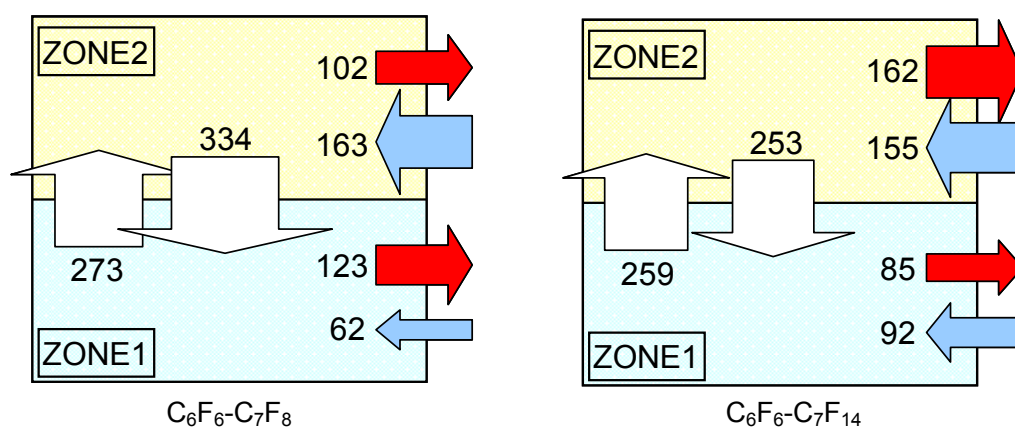
		PFT 捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [μg/m ³]		
		C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄	C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄
ZONE 1	居間	10.0	3.1	0.7	226.2	76.6	15.9
	和室	7.9	2.5	0.9	178.7	61.8	20.5
	台所	8.1	2.7	1.0	183.2	66.7	22.8
	吹抜直下	7.4	3.1	1.1	167.4	76.6	25.0
	平均	8.3	2.8	0.9	142.7	46.3	18.3
ZONE 2	洋室 1	4.2	3.4	1.3	95.0	84.0	29.6
	洋室 2	4.3	3.2	1.3	97.3	79.1	29.6
	洋室 3	5.4	3.2	1.2	122.1	79.1	27.3
	Family Hall	6.9	3.7	1.3	156.1	91.4	29.6
	平均	5.2	3.4	1.2	117.6	84.0	27.3
吹抜中空		8.7	4.1	1.0	89.3	54.8	25.0

以上より、Zone1、Zone2 及び住宅全体における、外気導入量とゾーン間の空気交換量算出結果を表 5-14 に示す。

表 5-14 外気導入量及び換気回数算出結果 (PFT 法)

	外気導入量 [m ³ /h]			換気回数 [回/h]		
	Zone1	Zone2	全体	Zone1	Zone2	全体
C ₆ F ₆ -C ₇ F ₈ 組合せ	62	163	225	0.40	1.03	0.70
C ₆ F ₆ -C ₇ F ₁₄ 組合せ	92	155	247	0.60	0.98	0.76

また、各ゾーンにおける外気導入量及び空気交換量算定結果図を図 5-11 に示す。

図 5-11 PFT 法 II による換気量算出結果図 [m³/h]

全体結果としては C₆F₆-C₇F₈、C₆F₆-C₇F₁₄ の組み合わせに関係なく 0.70 回/h、0.76 回/h と等しい結果となった。しかし、ゾーン間の空気交換量と空気の流動を比較すると差が見られた。

C₆F₆-C₇F₈ 条件は 2 階から流入された外気が 1 階からも排出される結果となり流れは 2 階から 1 階に形成される。一方、C₆F₆-C₇F₁₄ 条件では 1 階と 2 階に流入された外気導入量と各階で排出される排気量は等しくなった。各ゾーン間の混合があるためショートサーキットではないが、住戸内での顕著な一様流は形成されなかった。

このように、ゾーン間での空気交換量に差が見られた結果は、サンプリングレートの算出試験での偏差と PFT 各物質の分析回収率の偏差、また C₇F₁₄ の捕集量が少なかったことによるものと考えられる。

この結果から、今後はサンプリングレートの気中濃度による依存性を少なくするため、室の有効混合容積と換気量予想値から各 PFT の予想濃度範囲を設定し気中濃度を予め予測して、サンプリングレート算出実験での気中濃度範囲に入るよう PFT ドージング量を調整する必要性が示された。

5.3.5 測定結果まとめ

表 5-15 に各測定方法で得られた換気回数算出結果をまとめる。

表 5-15 各測定法による換気回数算出結果のまとめ

測定方法		測定対象空間 （測定ゾーン）	外気導入量 [m³/h]	換気回数 [回/h]	
風量測定)	給気	住宅全体	107	0.33	
	排気	住宅全体	214	0.66	
風量測定)	給気	住宅全体	120	0.37	
	排気	住宅全体	220	0.68	
CO ₂ 法		居間・台所・吹抜け	98	0.85	
		洗面所	17	0.83	
		和室	20	0.82	
		洋室 1	15	0.52	
		洋室 2	16	0.66	
		洋室 3	28	1.15	
		Family Hall	12	0.72	
		住宅全体	205	0.63	
CO ₂ 法		住宅全体	204	0.63	
SF ₆ 法		住宅全体	-	0.45	
PFT 法		住宅全体	175	0.54	
PFT 法		C ₆ F ₆ -C ₇ F ₈ 組合せ	ZONE1（1 階）	62	0.40
			ZONE2（2 階）	163	1.03
			住宅全体	225	0.70
		C ₆ F ₆ -C ₇ F ₁₄ 組合せ	ZONE1（1 階）	92	0.60
			ZONE2（2 階）	155	0.98
			住宅全体	247	0.76

) 風量測定は 10:30 測定を風量測定 、12:30 測定を風量測定 とした

第1種換気システムを備えた新築2階建戸建住宅の換気量測定を行い、以下の結果を得た。

1) 対象住宅の換気量を測定すると同時に、温湿度、風向・風速の外乱測定を行った。測定期間中の室内平均温度は外気と比較して3℃程度高く、風は北面から連続的に微風が吹いていた。

各測定法による測定期間は必ずしも一致してはいないが、温湿度測定及び風向・風速測定結果に測定日による大きな違いが見られなかった。

2) 同時期に測定を行ったCO₂法Ⅱ、SF₆法、PFT法Ⅰにおける換気回数はそれぞれ0.63、0.45、0.54回/hとなった。SF₆法は他の測定法に比べ低い値を示したが、SF₆法は濃度減衰法を用いた短時間測定の結果であること、またPFT法ⅠはC₆F₆が住宅全体で気中濃度にばらつきが見られたことが、各測定法間に差が生じた原因と考えられる。しかし、測定法による結果の違いが大きくなりPFT法はSF₆法、CO₂法と同等な結果が得られると考えられる。

3) 排気口からの風量測定では、給気口からの風量測定結果より2倍近く大きな風量を示した。排気口付近の開口部からの空気流入をそのまま排気するショートサーキットも含めた結果と考えられるため、実際は排気風量から算出した換気回数より低い値となると考えられる。

4) C₆F₆–C₇F₈、C₆F₆–C₇F₁₄の組み合わせによる測定結果は、住戸全体では0.70回/h、0.76回/hと同等な結果となった。しかし、ゾーン間の空気交換量と空気流動には差が見られた。これは、サンプリングレートの算出試験での偏差とPFT各物質の分析回収率の偏差、またC₇F₁₄の捕集量が少なかったことによるものと考えられる。

そのため、今後はサンプリングレートの気中濃度による依存性を少なくするため、室の有効混合容積と換気量予想値から各PFTの予想濃度範囲を設定し気中濃度を予め予測して、サンプリングレート試験から精度が確保できる気中濃度範囲に入るようPFTドージング量を調整する必要性が示された。

5.4 同一分譲地区内の新築戸建住宅2戸における換気量実測

5.4.1 目的

ダクトレス第1種換気設備が備えられた、同一分譲地区内の戸建住宅2戸を対象に換気量実測を行った^{11) 12) 13)}。

本実測では風量測定法、SF₆一定濃度法、CO₂一定濃度法を用いた換気量測定法とPFT法の測定結果を比較し、PFT換気量測定法の精度の検証を行う。更に、必要換気量確保のために設けられた換気設備が設計通りに動作しているか、実際の住宅に設置した際の換気量はどの程度なのかを把握することを目的とした。

実測時の換気条件としては、住戸Aにおいては第1種換気、自然換気の2条件、住戸Bにおいては第1種換気条件とした。

5.4.2 実測概要

測定期間は2005年8月22日～8月25日とした。実測スケジュールを表5-16に示す。測定対象住宅は、千葉県松戸市に立地する2005年8月竣工予定のダクトレス第1種換気設備が備えられた、同分譲地区内の戸建住宅2戸である。図5-12に測定対象住戸の配置図及び住宅外観、平面図を示す。住戸Aは角地であり、南面と東面を道路に接している。住戸Bは南面が道路に接しており、道路を挟んで向かい側にグラウンドがある。周辺は低層住宅に囲まれている。

住戸Aは2階建の住戸全体を3ゾーンに分け、SF₆、CO₂、PFTをトレーサースガスとして換気量測定を行い、住戸全体の外気導入量及び各ゾーン間の空気交換量を算出した。第1種換気条件では、PFT法、SF₆法、CO₂法で測定を行い、自然換気条件ではPFT法、CO₂法を用いた。

住戸Bは吹き抜けがある構造であり、1階をZONE1、2階をZONE2と2つのゾーンに分け、PFT法のための測定とした。実測時の換気条件は第1種換気とした。

更に、外乱因子として風向・風速をウェザーステーションを用いて測定した。

相当隙間面積は、気密測定器を用いて測定した。住戸A及び住戸Bの面積と容積を表5-17に示し、実測項目及び測定機器を表5-18に示す。

表5-16 同一分譲地区内の新築戸建住宅2戸における実測スケジュール

		8/22		8/23		8/24		8/25	
		am	pm	am	pm	am	pm	am	pm
換気状態				第1種換気			自然換気		
住戸A	温湿度測定			←					→
	SF ₆		← 放散	←	→				
	CO ₂		← 放散	←					→
	PFT		← 放散 9時	←	24時間測定 9時	→	← 15時	→ 24時間測定 15時	→
	風量測定	↔							
	風向・風速測定		←		→				
	気密測定	↔							
住戸B	温湿度測定			←					→
	PFT		← 放散 9時	←	24時間測定 9時	→			
	風量測定	↔							
	気密測定		↔						



図 5-12 同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸の配置図及び住宅外観、平面図

表 5-17 各住戸の床面積と容積

住戸 A	1 階	2 階		全体
	ZONE1	ZONE2	ZONE3	
床面積 [m ²]	60	37	17	114
容積 [m ³]	145	88	40	274
住戸 B	ZONE1	ZONE2		全体
床面積 [m ²]	51	54		105
容積 [m ³]	124	132		256

表 5-18 実測項目及び測定機器

実測項目		測定機器	
外気導入量	SF ₆	Tracer gas	SF ₆ (ターゲット濃度 5ppm)
		測定機器	Multi-Gas Monitor (B&K1302) Doser & Sampler (B&K1303)
	CO ₂	Tracer gas	CO ₂ (ターゲット濃度 2000ppm)
		測定機器	多数室換気測定器 (コーナー札幌社製 SK-001)
		拡散機器	攪拌ファン 8 台
外気導入量 空気交換量	PFT	Tracer gas	C ₆ F ₆ 、C ₇ F ₈ 、C ₇ F ₁₄
		放散源	クリンプバイアル瓶
		放散量計量	電子天秤 (AandD 社製 GR-300)
		サンプラー	パッシブガスチューブ (SIBATA 社製)
風量測定		風量測定器 (コーナー札幌社製 KNS-300)	
外乱 (風向・風速)		気象観測機器 (AOR 社製 ヴァンテージ プロ) 風向・風速・温度・湿度	
温湿度		メモリー式温湿度計 (TABAI ESPEC THERMO RECORDER RS-11)	
相当隙間面積		気密測定器	

5.4.3 測定法概要

換気量測定法として PFT 一定発生法、SF₆ 一定濃度法、CO₂ 一定濃度法、風量測定法を用いた。外乱としては風速・風向を、そして各放散源周辺及び測定点周辺にて温湿度を計測した。測定法の詳細については本章「5.2 測定法概要」で説明している。また、本測定では建物の気密測定を行った。

以下に本実測における測定法の概要を説明する。

(1) 温湿度測定

換気には風力換気の他にも室内と外気との温度差による密度差換気がある。また、PFT 法において、PFT のサンプリングレート及び放散源からの PFT 放散量は温度に依存する。計測にはメモリー式温湿度計を用いた。

(2) 相当隙間面積測定（気密性測定）

住宅の気密性指標として相当隙間面積という概念がよく使われる。住宅の単位面積当たりどれぐらいの隙間が存在するかを表す指標である。また、差圧（外部風速）が分れば相当隙間面積から簡単に換気量の算出ができる。図 5-13 に示すように、気密測定器を用いて隙間面積測定を行った。



図 5-13 気密測定風景

(3) 風量測定

風量は風量測定器（KNS-300、コーナー札幌社製）を用いた。

(4) PFT 一定発生法

PFT (Perfluorocarbon Tracergas) 法を用いた換気量測定では、トレーサーガスとして C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} を用いた。シリコンを放散膜として使用したクリンプバイアルの PFT 放散源を作製し、液体の PFCs を充填する。放散量調節のため C_6F_6 、 C_7F_8 放散源には 1mm 厚のシリコン膜の上下に、それぞれ直径 2.0mm、3.0mm の穴を開けたアルミ板を置いた。 C_7F_{14} 放散源には 1mm 厚のシリコン膜のみを使用した。

PFT 気中濃度が均一になるように、PFT 放散源を給気口付近に設置すると共に、攪拌ファンを用いてゾーン内を攪拌した。サンプラーは各ゾーンの中央部に設置した。住戸 A は 1 階を ZONE 1、2 階の洋室・納戸・廊下を ZONE 2、2 階の和室を ZONE 3 とした。PFT 放散源は ZONE 1 に C_6F_6 を 2 本、ZONE 2 に C_7F_8 を 2 本、ZONE 3 に C_7F_{14} を 2 本設置した。

住戸 B は 1 階を ZONE 1、2 階を ZONE 2 とした。PFT 放散源は ZONE 1 に C_6F_6 を 2 本、ZONE 2 には C_7F_{14} を 6 本設置した。

(5) SF_6 一定濃度法

マルチガスモニター (B&K1302) 及びドーズー&サンプラー (B&K1303) を用いてトレーサーガスの濃度を測定した。 SF_6 ターゲット濃度を 5ppm と設定した一定濃度法を用いた。

(6) CO_2 一定濃度法

多数室換気測定器 (SK-001、コーナー札幌社製) を用い、トレーサーガスとしては CO_2 を放散させて換気量を測定した。本実測ではターゲット濃度を 2000ppm に設定した一定濃度法を用いた。各ゾーンにドーズーとサンプラーを設置し、各ゾーンにおける外気導入量及び住宅全体での外気導入量測定を試みた。

(7) 外乱測定 (風速・風向測定)

室内の換気量は外部風速及び風向に影響をうける。気象観測機器を外部に設置し、外気温湿度・風速・風向を計測した。

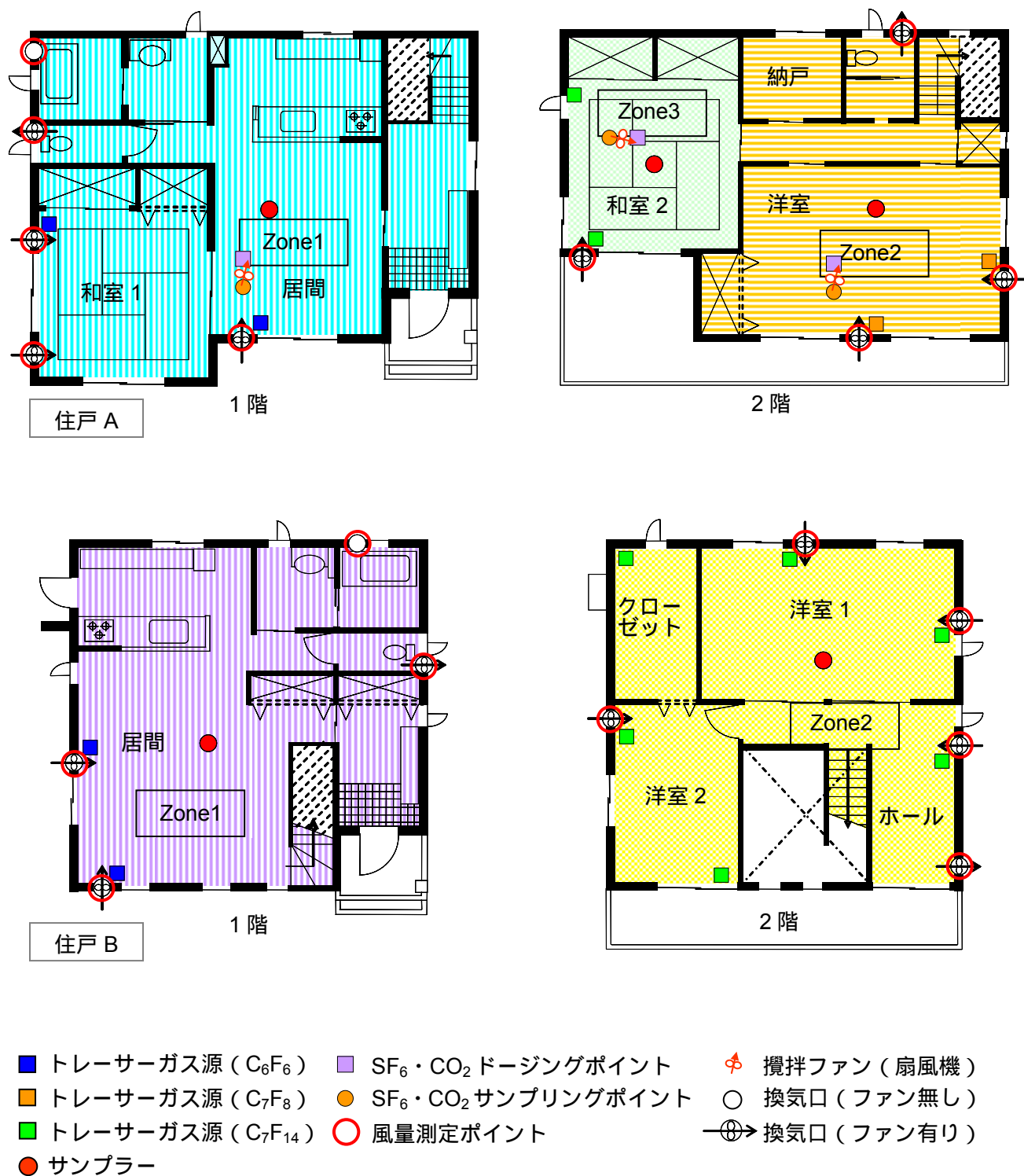


図 5-14 換気量測定器具設置図

5.4.4 温湿度測定結果

測定期間中の平均温湿度、最高温度、最低温度を表 5-19 に示す。室内測定点における温度変化は、住戸 A では第 1 種換気時で室内平均温度 $28.5 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 、自然換気時で $27.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度であり、自然換気条件時の方が低かった。住戸 B では 29.0 ± 2.0 の範囲内で変動しており、どちらの住戸も温度分布は小さかった。室内温度は外気温度を 3°C 程度上回っていた。

表 5-19 温湿度測定結果

測定条件			平均温度 [$^{\circ}\text{C}$]	最高温度 [$^{\circ}\text{C}$]	最低温度 [$^{\circ}\text{C}$]	平均湿度 [%]
住戸 A	第 1 種換気	ZONE1	28.4	30.7	26.2	73
		ZONE2	28.4	31.3	27.0	70
		ZONE3	28.3	30.9	26.7	71
		外気	24.7	31.8	21.6	88
	自然換気	ZONE1	27.0	28.6	26.3	73
		ZONE2	27.0	28.8	26.2	71
		ZONE3	26.8	28.0	26.0	72
		外気	23.3	26.2	21.8	85
住戸 B	第 1 種換気	ZONE1	28.6	30.4	26.6	74
		ZONE2	29.0	31.0	26.7	70
		外気	25.0	31.8	21.5	82

5.4.5 気密測定結果

気密測定器を用いて住宅の気密測定を行った結果を表 5-20 に示す。C 値は住戸 A が $6.11 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 、住戸 B が $3.98 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ となった。

建築環境・省エネルギー機構 (IBEC) で定めた基準値で、関東地域 (IV 地域) では C 値 $5.0 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 以下は高気密住宅となる。

住戸 B は高気密住宅に分類された。一方、住戸 A は今回の実測では高気密住宅の性能には至らなかったが一部がまだ施工段階であったため、完工後は C 値はより小さくなると予想される。

表 5-20 気密測定結果

	住戸 A		住戸 B	
	総隙間面積 [cm^2]	相当隙間面積 [cm^2/m^2]	総隙間面積 [cm^2]	相当隙間面積 [cm^2/m^2]
1 回目	698	6.13	418	3.98
2 回目	684	6.01	413	3.94
3 回目	704	6.18	423	4.03
平均	695	6.11	418	3.98

5.4.6 風量測定結果

給気口・排気口など換気口に直接装着することにより風量を測定する風量測定器を用いた。測定は8月22日10:00～12:00に行った。測定時には室間のドアを開放し、第1種換気モードに設定した。住戸A、住戸Bの各測定点における風量測定結果を表5-21に示す。

表 5-21 風量測定結果 [m³/h]

		測定場所	風量	設計風量	給気・排気	ゾーン毎の風量	
住戸 A	ZONE 1	和室 南	34	20	給気	104 (60)	
		和室 北	31	20	給気		
		居間 南	40	20	給気		
		トイレ	停止	30	排気	- (50)	
		浴室	-	50	排気		
	ZONE 2	洋室 南	33	20	給気	61	
		洋室 東	28	20	給気	(40)	
		納戸	停止	105	排気	30	
		トイレ	30	30	排気	(30)	
	ZONE 3	和室 南	37	20	給気	37 (20)	
住戸全体	給気	201 (120)					
	排気	-					
住戸 B	ZONE 1	居間 南	41	20	給気	76	
		居間 西	35	20	給気	(40)	
		トイレ	26	30	排気	113	
		浴室 (弱)	87	50	排気	(80)	
	ZONE 2	ホール南 弱	36	30	排気	36 (30)	
		ホール北	21	20	給気	70 (80)	
		洋室 1 東	16	20	給気		
		洋室 1 北	15	20	給気		
		洋室 2 西	18	20	給気		
	住戸全体	給気	146 (120)				
		排気	139 (110)				

括弧 () 内は設計風量 [m³/h]

住戸 A では、いずれのゾーンにおいても設計風量を上回った。給気では前述通り、南側からの給気が多かったためであると考えられる。各ゾーンともバランスよく風量が設計されており、実測値でもバランスの良い給気量が確認された。

住戸 B では実測値では給気と排気がほぼ同じ値であり、この点では設計風量と同様であるが、風量自体は設計風量よりも少し大きな値を示した。給気及び排気量から、換気回数を算出した結果、給気、排気ともに必要換気回数 0.5 回/h に近い値となった。

各測定ゾーンにおいて、測定換気量と設計風量には差が見られた。また、住戸 A 及び住戸 B の 1 階の実測値が、設計風量よりも大きな値を示したが、これは測定時に外部で強い南風が吹いていたことにより、南側からの給気が多かったためである。

設計風量による給排気量から換気回数は、両住戸とも 0.5 回/h を僅かに下回っている。しかし、設計風量は収納等の容積を除外した設計しているため、実際には必要換気回数を満たしていると考えられる。

5.4.7 住戸 A における換気量測定結果

住戸 A では、トレーサーガス法として PFT 一定発生法、SF₆ 一定濃度法、CO₂ 一定濃度法を用いて換気量測定を行った。1 階を ZONE 1、2 階を ZONE 2 と ZONE 3 にし、住戸全体を 3 ゾーンに分け、それぞれのゾーンに C₆F₆、C₇F₈、C₇F₁₄ を放散させた。換気条件は第 1 種換気及び自然換気の 2 条件である。

(1) PFT 法測定結果

第 1 種換気条件

測定期間は 8 月 23 日 16:00～8 月 24 日 10:00 である。第 1 種換気時の測定における各ゾーンの PFT の放散量・放散速度・捕集量測定結果を表 5-22、室間の空気交換量結果を表 5-23、換気量算出結果を表 5-24 に示す。また、換気量算出結果図を図 5-15 に示す。

表 5-22 住戸 A における PFT 測定結果 (第 1 種換気条件)

PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]	捕集量 [μg]			気中濃度 [μg/m ³]		
				ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3
C ₆ F ₆	和室 1	0.178	7.41	11.01	3.48	1.06	240.4	75.8	23.2
	居間	0.153	6.35						
	合計	0.330	13.76						
C ₇ F ₈	洋室 東	0.124	5.17	2.07	5.53	1.10	43.0	114.5	22.8
	洋室 南	0.119	4.95						
	合計	0.243	10.12						
C ₇ F ₁₄	和室 2 南	0.019	0.80	0.21	0.98	12.24	5.5	24.9	311.4
	和室 2 西	0.021	0.90						
	合計	0.041	1.69						

表 5-23 空気交換量結果 (第 1 種換気条件) [m³/h]

$Q_{1,0}$	41	$Q_{1,2}$	31
$Q_{2,0}$	75	$Q_{1,3}$	-
$Q_{3,0}$	0	$Q_{2,1}$	24
$Q_{0,1}$	34	$Q_{2,3}$	2
$Q_{0,2}$	63	$Q_{3,1}$	-
$Q_{0,3}$	5	$Q_{3,2}$	7

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j へ移動する流量

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i へ移動する流量

表 5-24 PFT 法換気量算出結果 (第 1 種換気条件)

	容積 [m ³]	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	145	41	0.28
ZONE2	88	63	0.71
ZONE3	40	5	0.12
全体	274	109	0.40

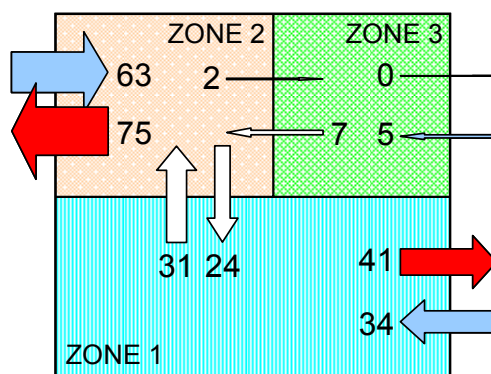


図 5-15 住戸 A における PFT 換気量算出結果図 (第 1 種換気条件) [m³/h]

自然換気条件

測定期間は8月24日17:00～8月25日14:00である。自然換気時の測定における各ゾーンのPFT放散量・放散速度・捕集量測定結果を表5-25、空気交換量結果を表5-26、換気量算出結果を表5-27に示す。また、換気量算出結果図を図5-16に示す。

表 5-25 住戸 A における PFT 測定結果（自然換気条件）

PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]	捕集量 [μg]			気中濃度 [μg/m ³]		
				ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3
C ₆ F ₆	和室 1	0.160	6.66	20.43	13.68	8.99	335.5	224.6	147.8
	居間	0.137	5.70						
	合計	0.297	12.36						
C ₇ F ₈	洋室 東	0.113	4.72	6.00	15.89	9.83	93.6	247.9	153.5
	洋室 南	0.110	4.59						
	合計	0.224	9.31						
C ₇ F ₁₄	和室 2 南	0.016	0.68	1.35	3.35	28.66	25.9	64.1	549.5
	和室 2 西	0.019	0.81						
	合計	0.036	1.49						

表 5-26 空気交換量結果（自然換気条件）[m³/h]

Q _{1,0}	16	Q _{1,2}	33
Q _{2,0}	31	Q _{1,3}	-
Q _{3,0}	0	Q _{2,1}	19
Q _{0,1}	31	Q _{2,3}	3
Q _{0,2}	15	Q _{3,1}	-
Q _{0,3}	1	Q _{3,2}	4

Q_{i,j} : ZONEi から ZONEj へ移動する流量

Q_{0,i} : 外気から ZONEi へ移動する流量

表 5-27 PFT 法換気量算出結果（自然換気条件）

	容積 [m ³]	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	145	31	0.21
ZONE2	88	15	0.20
ZONE3	40	1	0.04
全体	274	47	0.17

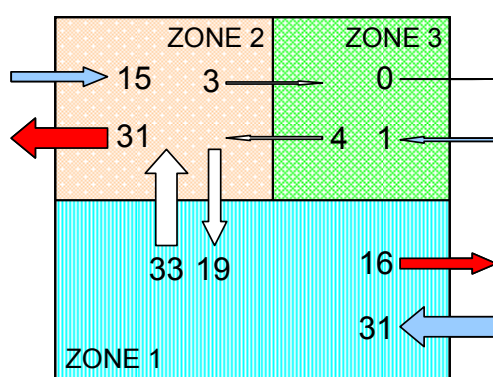


図 5-16 住戸 A における PFT 換気量算出結果図（自然換気条件）[m³/h]

両換気条件のまとめ

第1種換気条件及び自然換気条件における換気回数算出結果を表5-28に示す。

表5-28 住戸Aにおける各換気条件によるPFT換気量測定結果

		第1種換気	自然換気
換気回数 [回/h]	ZONE1	0.28	0.21
	ZONE2	0.71	0.20
	ZONE3	0.12	0.04
	全体	0.40	0.17

1) 第1種換気条件

住戸全体での換気回数は0.40回/hとなった。外気導入量における換気回数は、ZONE1では0.28回/h、ZONE2では0.71回/h、ZONE3では0.12回/hとなり、ZONE3で外気導入量が少なかった。また、ZONE1は風量測定結果より小さな値を示した。

空気交換量では、上下階（ZONE1、ZONE2の間）での交換は見られたが、ZONE2、ZONE3間での空気交換が殆ど行われず、ZONE3は密室状態の結果となった。

2) 自然換気条件

住戸全体での換気回数は0.17回/hとなった。外気導入量は、ZONE1では0.21回/h、ZONE2では0.20回/h、ZONE3では0.04回/hとなり、いずれのゾーンでも換気量は小なかった。室間空気交換量においては、第1種換気時と同様に上下階（ZONE1、ZONE2間）での交換は見られたが、ZONE2、ZONE3間での空気交換が殆ど見られず、ZONE3は密室状態となっていた。

ZONE3は、風量測定では第1種換気、自然換気共に十分な給気量が得られていたが、PFT法結果では低い値を示した。

後述のSF₆法やCO₂法ではこのような現象は見られなかったため、C₇F₁₄の捕集若しくは分析時に問題が生じた可能性が考えられる。

(2) SF₆を用いた換気量測定結果

本実測では、第1種換気条件においてのみ住戸Aを3つのゾーンに分けSF₆を用いた換気量測定を行った。図5-17に換気量の時間変化を、各ゾーンにおける外気導入量及び換気回数算出結果を表5-29に示す。

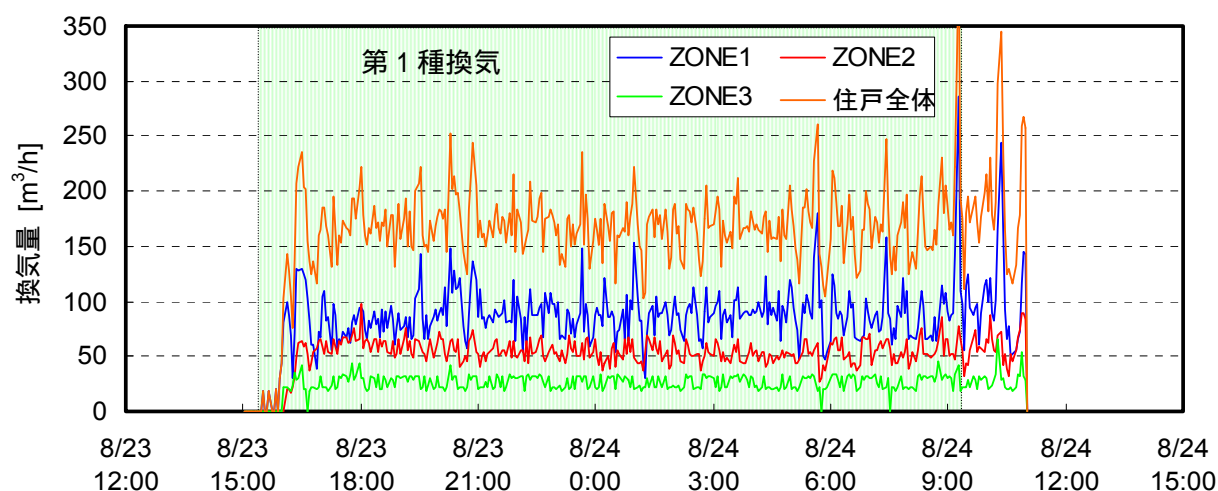
図 5-17 SF₆法による換気量経時変化

表 5-29 第1種換気条件における外気導入量及び換気回数算出結果

	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	88	0.61
ZONE2	55	0.62
ZONE3	26	0.66
住戸全体	169	0.62

測定期間中は全てのゾーンにおいて、気中濃度がターゲット濃度の 5ppm 付近で一定となっており、SF₆法一定濃度法の制御がよく行われていた。住戸全体では 0.62 [回/h] の換気回数を得られ、またいずれのゾーンにおいても換気回数 0.61～0.66 [回/h] となり、住戸 A に設けられている第1種換気システムは安定した換気量確保性能を有していることが確認された。

(3) CO₂を用いた換気量測定法結果

SF₆法と同様に住戸Aを3ゾーンに分け、第1種換気、自然換気の2条件においてCO₂を用いた換気量測定を行った。図5-18に換気量の時間変化を、各ゾーンにおける外気導入量及び換気回数算出結果を表5-30に示す。

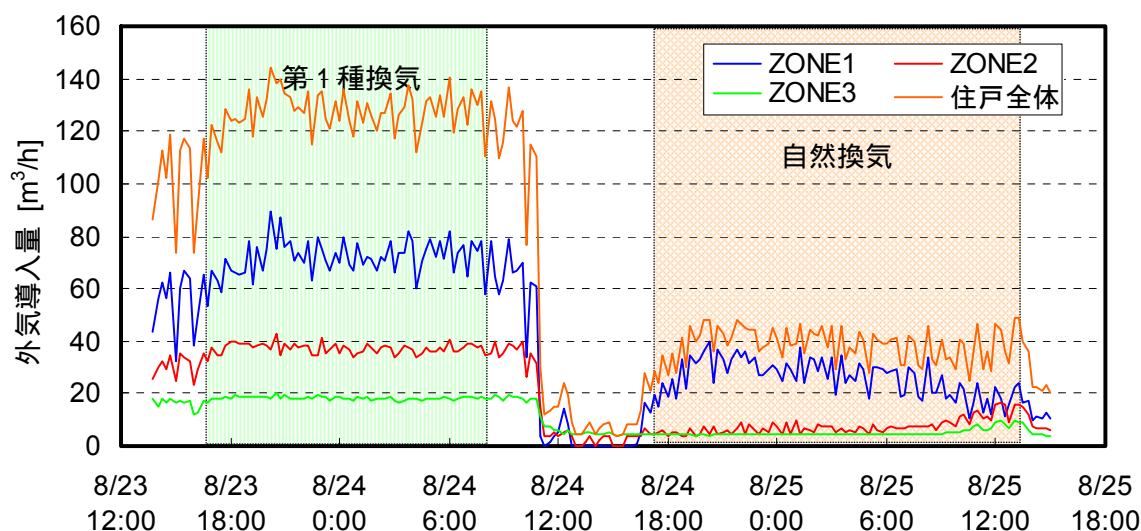
図 5-18 CO₂法による換気量の経時変化

表 5-30 各ゾーンにおける外気導入量及び換気回数算出結果

	第1種換気		自然換気	
	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	71	0.49	25	0.18
ZONE2	37	0.42	8	0.09
ZONE3	18	0.45	5	0.12
住戸全体	126	0.46	38	0.14

第1種換気条件、自然換気条件ともに、全てのゾーンにおいて、気中濃度はほぼ一定となっていた。

第1種換気条件においては、住戸全体で換気回数が0.46回/hと、必要換気回数0.50回/hに近い値となった。更に、どのゾーンにおいても外気導入量の偏差は少なく、第1種換気システムの安定した換気性能が確認された。

自然換気条件においては、住戸全体で換気回数が0.14回/hとなりPFT法の結果とほぼ同等な結果が得られた。

5.4.8 住戸 A における各測定法の測定結果の比較

住戸 A において、PFT 法による測定では ZONE3 における外気導入が殆ど行われていなかったため、「ZONE 1、ZONE 2 のみの結果」と「ZONE 1、ZONE 2、ZONE 3 の住戸全体についての結果」を区分して他の測定法結果と比較する。

「(1) 項」では ZONE 1、ZONE 2 における換気量だけを対象にして比較検討をし、「(2) 項」で ZONE 3 を含めた住戸全体を対象にして比較検討を行う。

(1) ZONE1, ZONE 2 合計値の比較

住戸 A の ZONE 1、ZONE 2 で得られた各測定法の換気量算出結果を表 5-31 に、その比較グラフを図 5-19 に示す。

表 5-31 ZONE1, ZONE2 の合計による換気量算出結果

換気条件	測定方法		外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
第 1 種換気	風量測定	給気	165	0.71
		排気	-	-
	PFT 法		104	0.45
	SF ₆ 法		143	0.61
自然換気	CO ₂ 法		107	0.46
	PFT 法		46	0.20
	CO ₂ 法		33	0.14

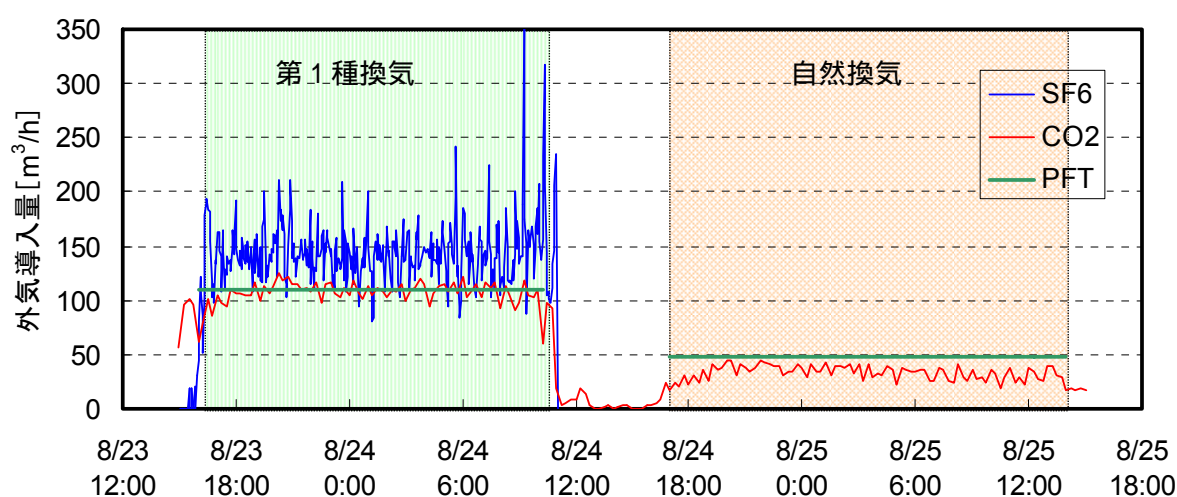


図 5-19 ZONE1, ZONE2 の合計による各条件の外気導入量結果

第 1 種換気条件において、SF₆ 法では換気回数 0.61 回/h となり、CO₂ 法では 0.46 回/h、PFT 法では 0.45 回/h となった。PFT 法では、ZONE 1 で換気量が少なく ZONE 2 では多い結果を示したが、住戸全体では 0.47 回/h と必要換気回数 0.50 回/h に近い値となった。

本測定では、PFT 法、CO₂ 法が近い値を示したが、SF₆ 法、風量測定法は多少大きな値を示した。

自然換気条件においては、PFT 法の外気導入量は、CO₂ 法よりやや大きい値となったが、その差は 0.06 回/h と小さかった。

(2) 住戸全体での比較

住戸 A における各測定方法で得られた ZONE 1、ZONE 2、ZONE 3 の住戸全体の換気回数算出結果を表 5-32 に、また各測定法による外気導入量の結果比較グラフを図 5-20 に示す。

表 5-32 住戸全体における換気量算出結果

換気状態	測定方法	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
第 1 種換気	風量測定	給気	201
		排気	-
	PFT 法		109
	SF ₆ 法		169
	CO ₂ 法		126
自然換気	PFT 法		47
	CO ₂ 法		38

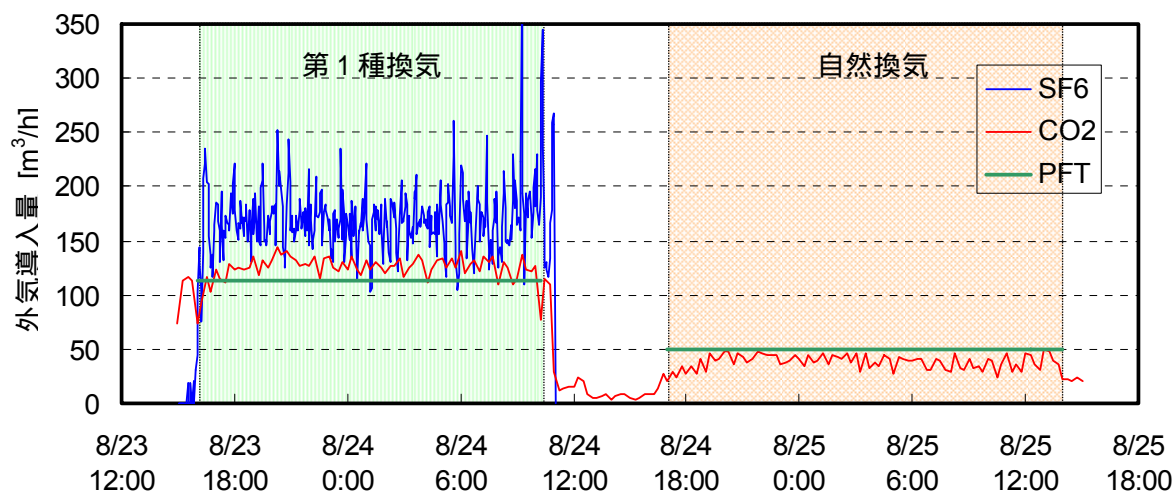


図 5-20 住戸 A における各測定法による外気導入量の結果

風量測定法は 3 種のトレーサーガス法に比べ大きな換気量となったが、これは給排気口での風量であって、実際の住宅における換気量を評価するものではない。

第 1 種換気条件における PFT、SF₆、CO₂ の 3 種のトレーサーガス法は 0.40～0.62 回/h の換気回

数結果を示し、この住宅に設置された第 1 種換気設備は必要換気回数 0.5 回/h に近い換気量が確保できることが確認された。

第 1 種換気条件において、SF₆法では換気回数 0.62 回/h、CO₂法は 0.46 回/h、PFT 法は 0.40 回/h となった。外気導入量の変化は、SF₆法では変動が大きく、CO₂法は振幅の変化が小さい結果となっているが、これは SF₆法がサンプリング周期が短く、また設定気中濃度も CO₂法の 2000ppm に比べて顕著に低い 5ppm であるため、濃度変動に敏感に反応した結果である。

自然換気条件において、PFT 法の外気導入量は、CO₂法よりやや大きい値を示したが、その差は小さかった。自然換気条件では必要換気量を確保できないことが確認され、常時換気設備の稼働が必要であることが分かった。

住戸全体を対象にして解析した結果も、PFT 法は、CO₂法の結果に近い値となった。しかし、PFT 法は ZONE3 の外気導入が殆ど行われていない結果となり実際より換気量を過小評価していると考えられる。

5.4.9 住戸 B における換気量測定結果

住戸 B では、トレーサーガス法としては PFT 一定発生法のみを用いた。住戸全体を 1 階と 2 階の 2 ゾーンに分け、 C_6F_6 、 C_7F_{14} を放散させ。換気条件は第 1 種換気である。

各ゾーンの PFT の測定結果を表 5-33 に示す。また、各ゾーン間の空気交換量を表 5-34 に、換気量算出結果を表 5-35 に示す。また、換気量算出結果図を図 5-21 に示す。

表 5-33 住戸 B における PFT 測定結果

PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]	捕集量 [μg]		気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
				ZONE1	ZONE2	ZONE1	ZONE2
C_6F_6 (ZONE1 放散)	居間 西	0.170	7.07	6.57	4.57	107.3	74.6
	居間 南	0.185	7.72				
	合計	0.355	14.78				
C_7F_{14} (ZONE2 放散)	ホール	0.020	0.82	6.53	7.93	124.5	150.9
	洋室 1 東	0.035	1.48				
	洋室 1 北	0.019	0.81				
	クローゼット	0.018	0.74				
	洋室 2 西	0.019	0.78				
	洋室 2 南	0.019	0.80				
	合計	0.130	5.43				

表 5-34 室間空気交換量結果 [m^3/h]

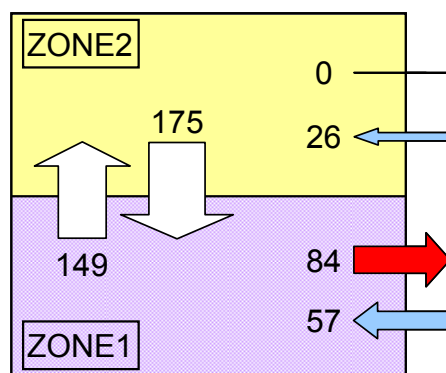
$Q_{1,0}$	84	$Q_{1,2}$	149
$Q_{2,0}$	0	$Q_{2,1}$	175
$Q_{0,1}$	57		
$Q_{0,2}$	26		

$Q_{i,j}$: ZONE*i* から ZONE*j* へ移動する流量

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE*i* へ移動する流量

表 5-35 住戸 B における PFT 換気量算出結果

		容積 [m ³]	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
外気導入量	ZONE1	124	57	0.46
	ZONE2	132	26	0.20
	全体	256	84	0.33

図 5-21 換気量算出結果 (住戸 B、第 1 種換気条件) [m³/h]

住戸全体での換気回数は 0.33 回/h となった。風量測定法では給排気共に、住戸全体で換気回数 0.50 回/h に近い値であり、風量測定法より低い結果となった。

ゾーンごとの結果は、ZONE 1 では 0.46 回/h、Zone2 では 0.20 回/h となり、特に ZONE 2 で外気導入量が不足していた。

原因としては、元々給気口からの設計給気量が 0.5 回/h に満たないことに加えて、外風の影響により給気口からの給気が妨げられた可能性が考えられる。

空気交換量から見ると、気流は ZONE 2 から ZONE 1 へ流れていた。ZONE 1 の浴室で排気ファンによる排気が行われていたことから、ZONE 1 での排気流量が優勢になったと考えられる。

5.4.10 測定結果まとめ

同一分譲地区内の新築戸建住宅2戸における測定で、住戸Aは第1種換気、自然換気の2条件とし、PFT法、SF₆法、CO₂法、風量測定法を、住戸Bは第1種換気条件においてPFT法、風量測定法を用いて測定を行い、以下のような結果を得た。

- 1) 住戸Aの第1種換気条件において、SF₆法では換気回数0.62回/h、CO₂法で0.46回/h、PFT法は0.40回/hとなった。PFT法は、CO₂法の結果に近い値となった。自然換気条件において、PFT法の外気導入量は、CO₂法とほぼ同等な結果が得られた。自然換気条件では必要換気量を確保できないことが確認され、常時換気設備の稼働が必要であることが分かった。
- 2) PFT換気量測定法による外気導入量及び各室間の空気交換量において、第1種換気・自然換気条件共に上下階（ZONE1・ZONE2間）での交換は見られたが、ZONE2・ZONE3間での空気の交換が殆ど見られず、ZONE3には外気からの空気導入も殆ど行われていない気密状態といった結果となった。風量測定法、SF₆法、CO₂法ではこのような現象は見られなかったため、これはC₇F₁₄のサンプリング若しくは分析時に問題が生じたことが原因と考えられる。
- 3) 住戸Aの実測では、風量測定法は給気による換気回数が0.73回/hとなり3種のトレーサーガス法に比べ大きな換気量となる傾向を示した。一方、3種のトレーサーガス法は0.40～0.62回/hの換気回数を示したため、この住宅に設置された第1種換気設備では必要換気回数0.5回/hに近い換気量が確保できることが確認された。
- 4) 住戸Bの換気システム稼働時のPFT法による住戸全体の換気回数は0.33回/hとなった。風量測定法では給排気ともに、住戸全体で換気回数0.5回/hに近い値であり、風量測定法の結果に比べて低かった。
ゾーンごとの結果は、ZONE1では0.46回/h、ZONE2では0.20回/hとなり、ZONE2では外気導入量が不足していた。給気口からの設計給気量が0.5回/hに満たないことに加えて、外乱の影響により給気口からの給気が妨げられた可能性が考えられた。空気交換は、ZONE2からZONE1へ行われていた。

5.5 工業地域の集合住宅における多数室換気実測

5.5.1 目的

本実測では、第3種換気システムと自然換気を組み合わせた「ハイブリッド換気システム」を備えた集合住宅において、ハイブリッド換気、常時第3種換気、自然換気の3種類の換気条件における換気量測定を行った。測定法としてパッシブ手法のPFT法（1次、2次実測）とアクティブ法（2次実測のみ：CO₂法、SF₆法）を比較し、PFT換気量測定法の有効性を検証することを目的とした。

更に、ハイブリッド換気システム稼働時の換気性能と常時第3種換気・自然換気条件での換気性能を比較し、ハイブリッド換気システムの実効性について検証した¹⁴⁾。

1次実測は2004年夏季に行い、第3種ハイブリッド換気システムの性能把握及び住宅における換気実態を把握することを目的とした。換気量測定法としてはPFT法のみを用い、住戸を3ゾーンに分けPFT3物質をそれぞれのゾーンに放散させた。

2次実測は2005年夏季に行い、アクティブ法であるCO₂法、SF₆法とパッシブ法であるPFT法を同時に用いて換気量測定を行い、3種類の換気条件下での換気量測定精度を比較検討した。また、第3種ハイブリッド換気システムの性能把握及び住宅における換気実態を把握する。

5.5.2 1次実測概要

神奈川県平塚市の工業地域に立地する集合住宅の第3種ハイブリッド換気設備が設置された、未入居の304号室を対象とした。換気状態3条件（ハイブリッド換気、自然換気、常時第3種換気）における換気量を把握する。住戸全体を3ゾーンに分け、住戸全体の換気量を把握すると共に、ゾーン間での空気交換量を算出した。換気量測定法としてはPFT法のみを用いた。

（1）調査対象住宅

測定対象住戸には第3種ハイブリッド換気設備が設置されている。対象住戸外観及び平面図を図5-22に、対象住宅概要を表5-36に示す。

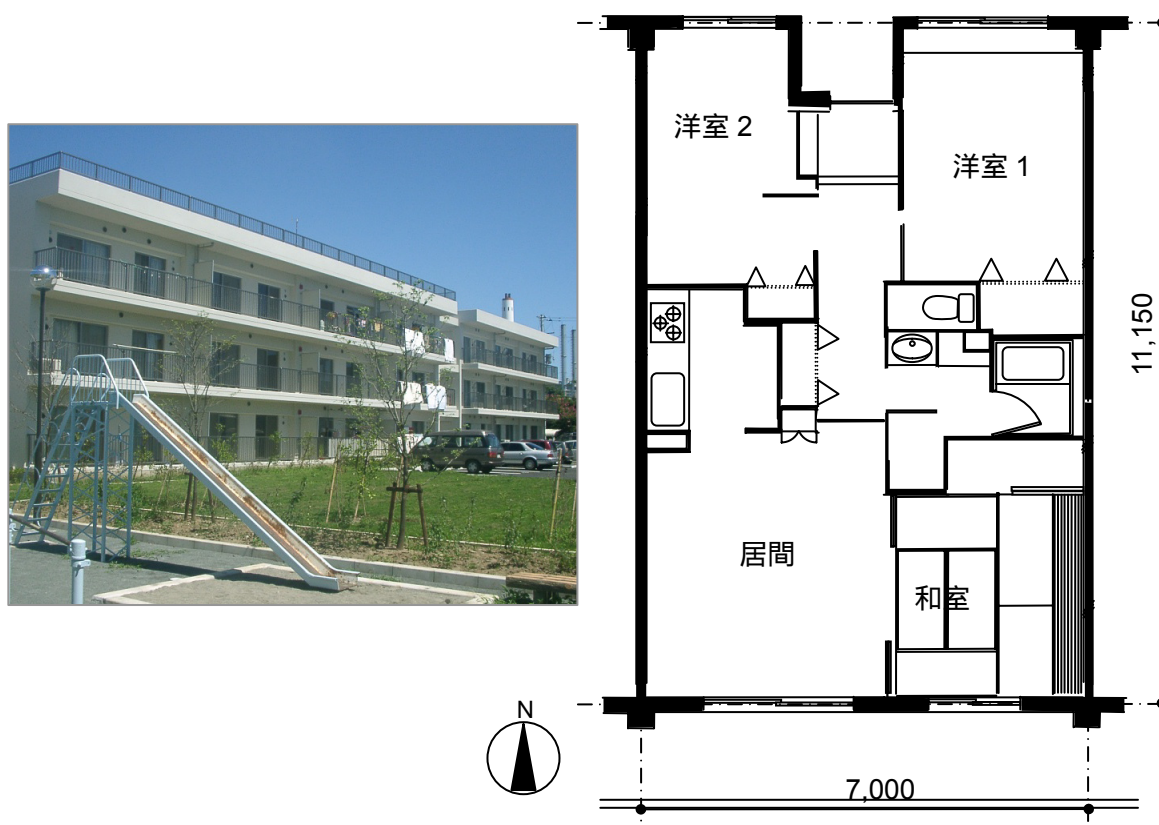


図 5-22 工業地域の集合住宅外観及び平面図

表 5-36 工業地域の集合住宅の概要

住居面積	80.5m ² (3LDK)
竣工年月	2002 年 4 月
周辺環境	工業地域
居住者	無
換気設備	第 3 種ハイブリッド換気
構造	RC

床面積及び室容積

	床面積 [m ²]	室容積 [m ³]
ZONE 1	41.5	78.5
ZONE 2	11.1	28.2
ZONE 3	19.1	45.4
全体	71.7	152.1

(2) 第3種ハイブリッド換気システムの概要

住宅平面図と共に換気システムの概要図を図5-23に示す。この住宅に設置されている第3種ハイブリッド換気システム（Wind24S）は、自然風を利用して集合住宅の居室の24時間換気を行うものであり、無風・微風時の自然換気のみでは換気量が不足する場合に、排気用の補助ファンが自動稼働する。

対象住宅の第3種ハイブリッド換気システムの特徴は以下のようである。

- ・風量調整ダンパー（CVD）が給気ダクトに設けられ、台風などの強風時は、過換気を防止するため風量調整ダンパーが働く。
- ・室内に供給された自然風は、居室を通して反対側の換気口から屋外へ排気される。
- ・風が弱く外気が流入しない場合は、自動的に補助ファンが稼働する。

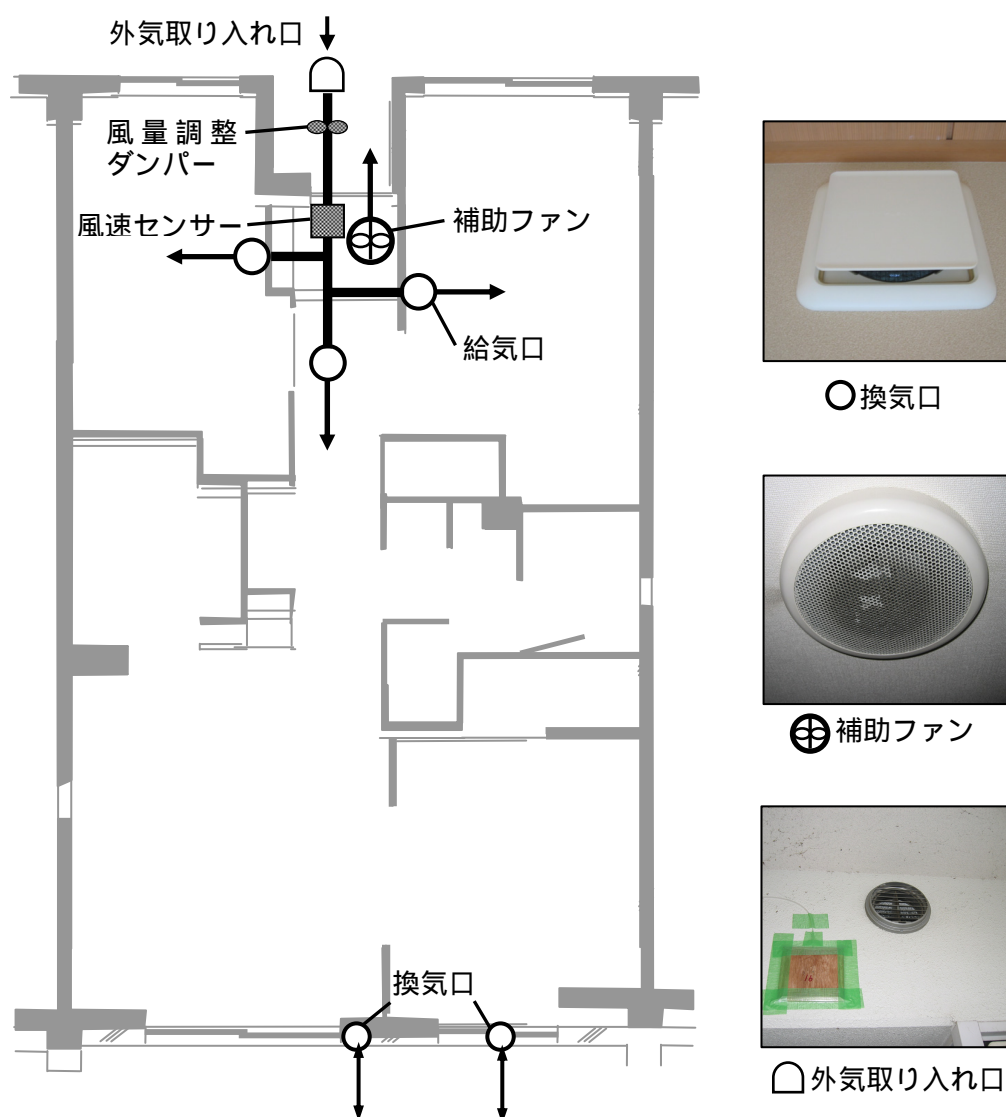


図 5-23 実測対象住宅の平面図及び換気設備の概要図

(3) 測定条件

換気条件はハイブリッド換気、自然換気、常時第3種換気の3条件である。住戸の4隅に設置された給気口はすべて封鎖し、給気は外気取り入れ口及び換気口から行われる。排気は補助ファン及び換気口から行われる。

表 5-37 に実測換気条件の概要を示す。

表 5-37 工業地域の集合住宅における実測換気条件概要

	給気	給排気	排気	風速センサー
	外気取り入れ口	換気口	補助ファン	
ハイブリッド換気				
自然換気			×	×
常時第3種換気				×

) 自然風が弱い時に稼動

ハイブリッド換気

当該換気システムの本来の運転状態であり、機械換気及び自然換気を併用して24時間換気を行う。給気は風上側の外気取り入れ口から、排気は風下側の換気口から行われる。無風・微風時など、自然風のみでは換気量が不足する場合は風速センサーが検知し、補助ファンが自動稼働する。

自然換気

補助ファン及び風速センサーを止め、機械換気システムを停止させた。補助ファンのグリルには目張りをし、給排気が行われないようにした。給気は自然風により風上側の外気取り入れ口から、排気は風下側の換気口から行われる。

常時第3種換気

換気システムの風速センサーを無効化し、補助ファンを常時運転させ常時機械排気を行う。給気は外気取り入れ口および換気口から、排気は常時補助ファンによって行われる。

5.5.3 1次実測測定法概要

(1) PFT 一定発生法

クリンバイアルに封入された PFCs をトレーサーガスとして放散させ、パッシブサンプラー（パッシブガスチューブ、SIBATA 社製）で 24 時間捕集し、放散量及びサンプラー捕集量から換気量を算出する。

住戸を 3 ゾーンに分け、ZONE 1 に C_6F_6 、ZONE 2 に C_7F_8 、ZONE 3 に C_7F_{14} を放散させた。PFT 放散源は壁面（床 1.2～1.6m）に設置した。また、各ゾーンにパッシブサンプラーを 1 本ずつ設置した。

図 5-24 に放散源及びサンプラー設置位置を示す。

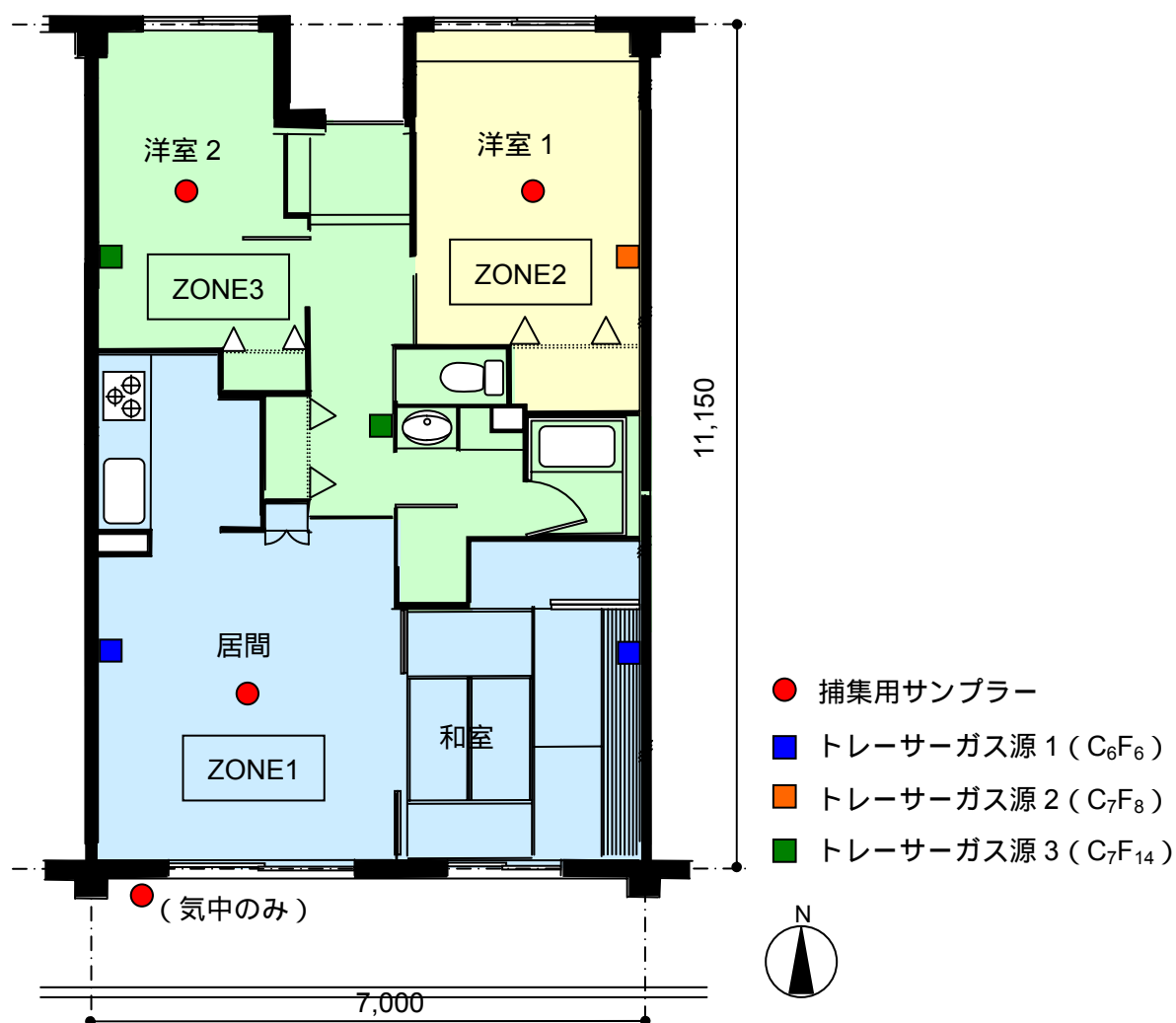


図 5-24 放散源及びサンプラー設置位置

測定スケジュールを表 5-38 に示す。

表 5-38 測定スケジュール

		時刻	実測スケジュール	換気条件
8/23	午前	10 時	PFT 放散源設置	ハイブリッド換気
	午後	15 時	パッシブサンプラー設置	
8/24	午前		↑ 24 時間捕集 ↓	
	午後	15 時	パッシブサンプラー回収	
	換気条件変更（ハイブリッド→自然換気）			自然換気
8/25	午前	10 時	パッシブサンプラー設置	
	午後		↑ 24 時間捕集 ↓	
8/26	午前	10 時	パッシブサンプラー回収	
	換気条件変更（自然換気→常時第 3 種換気）			常時第 3 種換気
	午後	15 時	パッシブサンプラー設置	
8/27	午前		↑ 24 時間捕集 ↓	
	午後	15 時	パッシブサンプラー回収	

（２） 温湿度測定

PFT の放散、サンプラーのサンプリングレートは温湿度に影響を受けるため、メモリー式温湿度計によって、外気と PFT 放散源及びサンプラー周辺の温湿度を測定した。

5.5.4 1次実測測定結果

(1) 温湿度測定結果

実測期間中の平均温湿度、最高温度、最低温度を表 5-39 に示す。

表 5-39 実測期間中の温湿度測定結果

測定条件			平均温度 [°C]	最高温度 [°C]	最低温度 [°C]	平均湿度 [%RH]
ハイブリッド 換気	外気		23.6	33.6	19.7	85
	ZONE1	気中	28.9	31.2	27.7	57
		PFT1	28.2	30.0	27.2	58
		PFT2	29.1	30.1	28.2	56
	ZONE2	気中	28.1	29.1	27.6	55
		PFT	28.3	28.7	27.9	57
	ZONE3	気中	27.6	28.4	27.0	56
		PFT1	28.0	28.6	27.6	56
		PFT2	27.5	28.1	27.0	52
自然換気	外気		25.9	30.9	23.3	65
	ZONE1	気中	29.1	30.6	28.2	58
		PFT1	28.6	29.7	27.8	59
		PFT2	29.0	29.7	28.5	59
	ZONE2	気中	27.9	28.4	27.5	58
		PFT	28.1	28.3	27.8	62
	ZONE3	気中	27.7	28.3	27.2	59
		PFT1	28.0	28.4	27.5	59
		PFT2	27.7	28.1	27.2	55
常時第 3 種 換気	外気		26.5	33.0	23.4	77
	ZONE1	気中	29.2	30.7	28.4	60
		PFT1	28.8	29.8	28.1	61
		PFT2	29.0	29.8	28.5	61
	ZONE2	気中	27.8	28.3	27.4	62
		PFT	27.9	28.1	27.7	66
	ZONE3	気中	27.8	28.6	27.3	64
		PFT1	28.0	28.5	27.6	65
		PFT2	27.7	28.5	27.3	59

各条件において、いずれの部屋でも差は小さく、各条件間での温度差によるサンプリングレートへの影響は少ないと判断された。ZONE1（居間）の温度が高くなっているが、これは日差しの影響を受けたためである。各部屋の相対湿度は外気に比べて低かった。

（２） 換気量測定結果

ハイブリッド換気条件

各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表 5-40、ゾーン間の空気交換量を表 5-41、各ゾーンにおける換気量（外気導入量）算出結果を表 5-42 に示す。

表 5-40 1 次実測のハイブリッド換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	ZONE1	ZONE2	ZONE3	ZONE1	ZONE2	ZONE3
C_6F_6	24.78	0.34	3.54	404.4	5.6	58.0
C_7F_8	1.45	10.84	2.23	22.5	168.6	34.7
C_7F_{14}	0.34	0.07	0.76	6.5	1.3	14.5

表 5-41 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	32
$Q_{1,3}$	8	$Q_{2,0}$	2
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	33
$Q_{2,3}$	11	$Q_{0,1}$	16
$Q_{3,1}$	25	$Q_{0,2}$	12
$Q_{3,2}$	1	$Q_{0,3}$	40

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i への空気移動

表 5-42 1 次実測のハイブリッド換気条件における換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	16	0.20
ZONE2	12	0.42
ZONE3	40	0.93
全体	67	0.45

自然換気条件

各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表 5-43、ゾーン間の空気交換量を表 5-44、各ゾーンにおける換気量（外気導入量）算出結果を表 5-45 に示す。

表 5-43 1 次実測の自然換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	ZONE1	ZONE2	ZONE3	ZONE1	ZONE2	ZONE3
C_6F_6	37.17	0.77	3.27	606.2	12.6	53.6
C_7F_8	3.24	17.15	3.24	50.2	266.9	50.4
C_7F_{14}	0.72	0.09	1.22	13.7	1.7	23.3

表 5-44 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	24
$Q_{1,3}$	3	$Q_{2,0}$	2
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	10
$Q_{2,3}$	6	$Q_{0,1}$	2
$Q_{3,1}$	25	$Q_{0,2}$	7
$Q_{3,2}$	2	$Q_{0,3}$	27

$Q_{i,j}$: Zone i から Zone j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から Zone i への空気移動

表 5-45 1 次実測の自然換気条件における換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	2	0.03
ZONE2	7	0.24
ZONE3	27	0.63
全体	36	0.24

常時第3種換気条件

各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表 5-46、ゾーン間の空気交換量を表 5-47、各ゾーンにおける換気量（外気導入量）算出結果を表 5-48 に示す。

表 5-46 サンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	ZONE1	ZONE2	ZONE3	ZONE1	ZONE2	ZONE3
C_6F_6	29.06	1.28	4.48	473.8	21.0	73.4
C_7F_8	0.91	11.26	1.54	14.1	175.3	24.0
C_7F_{14}	0.14	0.07	0.44	2.7	1.3	8.4

表 5-47 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	20
$Q_{1,3}$	15	$Q_{2,0}$	0
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	80
$Q_{2,3}$	13	$Q_{0,1}$	15
$Q_{3,1}$	19	$Q_{0,2}$	9
$Q_{3,2}$	4	$Q_{0,3}$	75

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i への空気移動

表 5-48 換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	15	0.19
ZONE2	9	0.33
ZONE3	75	1.75
全体	99	0.68

(3) 各換気条件における換気量測定結果のまとめ

各条件における外気導入量及び換気回数を比較したものを表 5-49 に示す。また、各換気条件におけるゾーン間空気交換量及び外気導入量の関係図を図 5-25 に示す。

表 5-49 1 次実測の各換気条件における外気導入量及び換気回数算出結果

	外気導入量 [m ³ /h]				換気回数 [回/h]			
	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3
ハイブリッド	67	16	12	40	0.45	0.20	0.42	0.93
自然換気	36	2	7	27	0.24	0.03	0.24	0.63
常時第3種	99	15	9	75	0.68	0.19	0.33	1.75

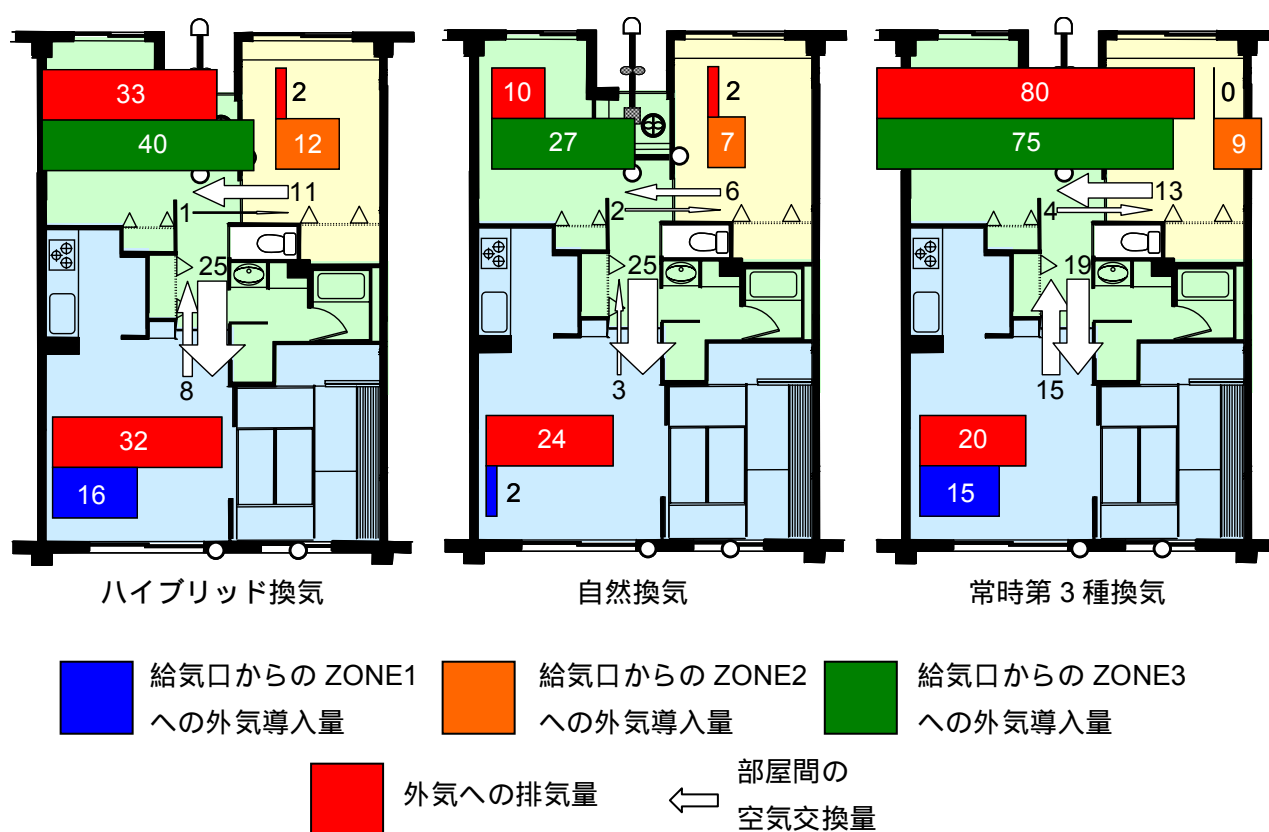


図 5-25 1 次実測の各換気条件におけるゾーン間空気交換量及び外気導入量 [m³/h]

以下に換気量測定結果をまとめる。

ハイブリッド換気条件

- 1) 住戸全体では外気導入量による換気回数が 0.45 回/h であり、第3種ハイブリッド換気システム及び ZONE1 に設置されている2つの換気口で、建築基準法で定められている必要換気回数 0.5 回/h に近い結果となった。
- 2) ZONE1 では、外気導入量による換気回数が 0.20 回/h と低い値を示した。ZONE1 に設置されている2つの換気口のみでは、十分な外気導入量が確保できなかった。また、ZONE3 からの空気の流入が多く、主に他室を経由した古い空気齢の空気が流入していた。
- 3) ZONE2 では、外気導入量による換気回数が 0.42 回/h となり、給気口の効果が見られた。他室から ZONE2 への空気の流入は殆どなく、ZONE2 に設置されている給気口からの外気導入が主な給気源となっていた。
- 4) ZONE3 では、外気導入量による換気回数が 0.93 回/h となった。給気口が2箇所を設置されていることに加え、補助ファンによる排気量が多いことから、給排気量共に多くなった。また、補助ファンの稼働により、ZONE1、2 からの空気流入が多くなった。

自然換気条件

- 1) 住戸全体では外気導入量による換気回数が 0.24 回/h となり、自然換気のみでは必要換気量を確保することは難しいことが分かった。
- 2) ZONE1 では、外気導入量による換気回数が 0.03 回/h と低い値を示した。ハイブリッド換気条件に比べて ZONE1 から流出する空気が少なくなったことと、ZONE1 に直接流入する外気量が減ったことが影響していた。ZONE1 への流入空気の殆どは、他のゾーンから流れてきたものであり、新鮮空気供給の面から考えると望ましくない空気環境になった。
- 3) ZONE2 では、外気導入量による換気回数が 0.24 回/h となった。ZONE2 に設置されている給気口からの外気導入が換気量の殆どを占め、他のゾーンからの空気流入は少なく、他のゾーンへの流出の割合が高かった。
- 4) ZONE3 では、外気導入量による換気回数が 0.63 回/h となり、補助ファンを停止したにも関わらず、単室としては必要換気量が確保されていた。ハイブリッド換気条件に比べ排気量は減少し、空気は ZONE1 へ移動し換気口から屋外に排気される換気性状を示した。

常時第3種換気条件

- 1) 住戸全体では外気導入量による換気回数は0.68回/hと必要換気量0.5回/hを上回っていた。
- 2) ZONE1では、外気導入量による換気回数が0.19回/hとなり、ハイブリッド換気条件と比較して同程度の値となった。ZONE3で補助ファンが常に稼働しており、本来自然換気によりZONE1の換気口から排気されるべき空気量の一部がZONE3に流れ、ZONE3から屋外へ排気されていることが分かった。
- 3) ZONE2では、外気導入量による換気回数が0.33回/hで、ハイブリッド換気時より低い結果となった。
- 4) ZONE3では、外気導入量による換気回数は1.75回/hと高い値を示した。補助ファンを常時稼働したことにより、他のゾーンからZONE3に空気が流入し、ZONE3の排気ファンから排気されたためである。

3条件の比較

- 1) ハイブリッド換気・常時第3種換気条件ではZONE3に直接流入する外気量も多かったが、補助ファンがあるZONE3で他のゾーンから流入した空気が排気されていた。
- 2) ハイブリッド換気・自然換気条件においては、他のゾーンからZONE1へ空気が流入し、ZONE1の換気口からの排気量が常時第3種換気に比較して増加した。
- 3) ZONE2ではいずれの条件条件においても排気量は少なく、外気からZONE2に導入された空気はZONE3へ流れる換気性状となった。
- 4) 補助ファンが稼働しているハイブリッド換気、常時第3種換気条件は補助ファンの効果が大きく、ZONE3からの排気量が多くなった。一方、自然換気条件ではZONE3で外気導入が多く、排気はZONE1の換気口から行われた。
- 5) いずれの換気条件でも、ZONE3>ZONE2>ZONE1の順に外気導入による換気回数が減少する傾向を見せた。ZONE3は過換気、ZONE1は換気不足といった住戸全体ではバランスのよくない換気性状を見せた。また、ZONE1へは他のゾーンから空気が流れ込み、古い空気齢の空気が流入されるため別途の給気専用の換気口を設置し、空気環境の改善を行う必要があった。

5.5.5 2次実測概要

換気条件を3条件設定し、各換気条件における換気量を測定した。換気条件は1次実測と同様にハイブリッド換気（換気設備本来の運転状態）、常時第3種換気、自然換気の3条件とし、換気量測定法としてはPFT一定発生法に加えSF₆一定濃度法、CO₂一定濃度法を用いた。実測期間は2005年6月28日～7月2日とした。実測タイムスケジュールを表5-50に示す。更に、実測前に実測住宅の気密測定を行い相当隙間面積を求めた。

表 5-50 2次実測スケジュール

換気状態	ハイブリッド換気			常時第3種換気		自然換気		
日時	6/24	6/28	6/29	6/30	7/1	7/2		
		18時	18時	10時	10時	15時		15時
PFT法	放散源設置	24時間捕集		24時間捕集		24時間捕集		
SF ₆	準備			実測				
CO ₂	準備			実測				
温度	準備			実測				
気密測定	測定							

5.5.6 2次実測測定法概要

図 5-26 に換気量測定用器具の設置図を示す。

(1) 温湿度測定

サンプラーのサンプリングレート及び、PFT の放散は温度に影響されるため、メモリー式温湿度計を用いてサンプラー及び PFT 放散源の近傍温度を測定した。

(2) 気密測定

相当隙間面積を求めるために、気密測定器を用いて測定を行った。

(3) PFT 一定発生法

トレーサーガスとして C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} 用い、ZONE1 には C_6F_6 、ZONE2 には C_7F_8 、ZONE3 には C_7F_{14} を設置した。PFT 放散源としては、PFC を充填したクリンプバイアル瓶に、放散膜としてシリコン膜を使用し、更に穴径のサイズを調整したアルミ板をシリコン膜の上下に貼り合わせて放散量の調整を行った。

(4) SF_6 一定濃度法

SF_6 一定濃度法にはマルチガスモニター (B&K1302) 及びドーズー&サンプラー (B&K1303) を用い、 SF_6 ターゲット濃度は 5ppm と設定した。本実測では各ゾーン毎にドーズーとサンプラーを設置し測定を行った。

(5) CO_2 一定濃度法

多数室換気測定器 (SK-001、コーナー札幌社製) を用い、 CO_2 ターゲット濃度を 2000ppm に設定した。本実測では各ゾーン毎にドーズーとサンプラーを設置し測定を行った。

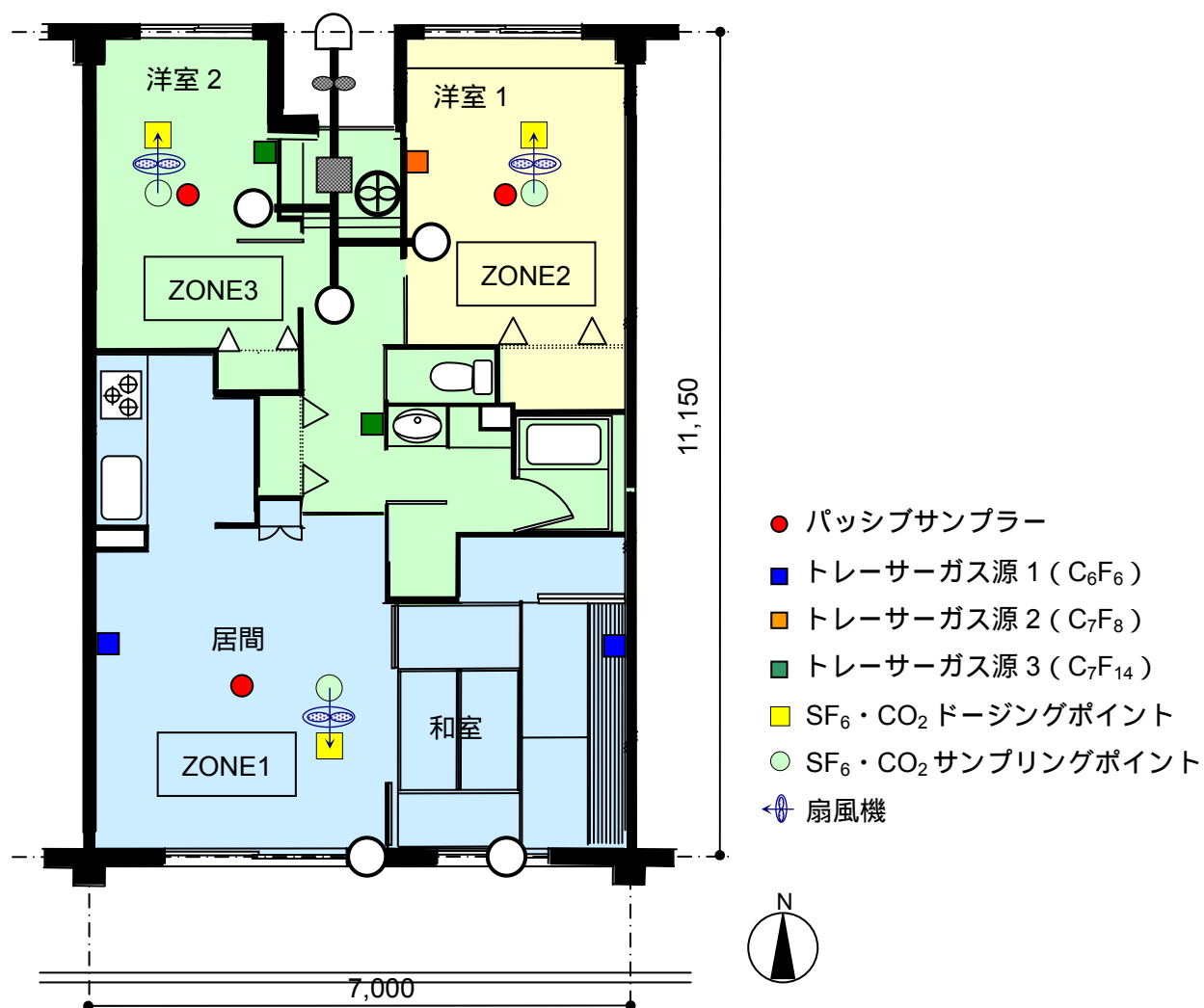


図 5-26 換気量測定器具設置図

5.5.7 2次実測測定結果

(1) 温湿度測定結果

測定期間中の平均温湿度、最高温度、最低温度を表 5-51 に示す。

表 5-51 実測期間中の温湿度測定結果

測定条件			平均温度 []	最高温度 []	最低温度 []	平均湿度 [%RH]
ハイブリッド 換気	ZONE1	気中	30.6	31.9	30.0	62
		PFT1	31.0	32.4	30.3	57
		PFT2	30.5	31.6	30.0	60
	ZONE2	気中	29.1	29.4	28.9	66
		PFT	29.3	29.7	29.0	68
	ZONE3	気中	30.4	31.2	29.7	66
		PFT1	30.1	30.7	29.6	61
		PFT2	30.7	31.5	30.0	59
常時第3種 換気	ZONE1	気中	29.8	30.8	29.0	63
		PFT1	30.0	30.9	29.3	58
		PFT2	29.7	30.4	29.1	61
	ZONE2	気中	28.7	29.1	28.5	66
		PFT	28.8	29.2	28.5	68
	ZONE3	気中	29.5	30.0	29.1	66
		PFT1	29.4	29.6	29.2	62
		PFT2	29.8	30.3	29.4	61
自然換気	ZONE1	気中	29.2	30.6	28.5	64
		PFT1	29.4	30.5	28.8	60
		PFT2	29.2	30.1	28.7	62
	ZONE2	気中	28.4	28.7	28.2	66
		PFT	28.4	28.8	28.0	69
	ZONE3	気中	28.9	29.4	28.5	66
		PFT1	29.0	29.3	28.8	62
		PFT2	29.2	29.6	28.7	61

いずれのゾーンでもハイブリッド換気、常時第3種換気、自然換気の順に温度は低くなっているがその差は小さく、PFT 気中濃度への影響は少ないと判断した。ゾーン毎では ZONE2 が他のゾーンと比べ低い値を示した。ZONE2 が北側であること、測定機器からの発熱の影響が他のゾーンより少なかったことが原因と考えられる。相対湿度の差は小さかった。

(2) 気密測定結果

相当隙間面積を測定した結果、ドア目張り無しの時 $0.81\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、ドア目張り有り $0.68\text{cm}^2/\text{m}^2$ となり、省エネルギー基準による高気密住宅（東京地域 $5\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下）であった。

トレーサーガスを用いた換気量実測時は目張りのない状態であるため、今回は $0.81\text{cm}^2/\text{m}^2$ を相当隙間面積とする。

(3) PFT 法測定結果

各ゾーン間は目張りを行わず、ゾーン間でも扉の隙間等を通しての空気交換が行われる。

ハイブリッド換気条件

ハイブリッド換気測定における各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表 5-52 に示す。また、各ゾーン間の空気交換量を表 5-53 に、換気量算出結果を表 5-54 に示す。

表 5-52 2 次実測のハイブリッド換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE1	43.58	0.59	2.29	707.3	35.2	11.2
ZONE2	8.63	0.32	33.15	140.9	513.7	6.2
ZONE3	11.85	3.45	8.59	192.6	132.6	65.4

表 5-53 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	15
$Q_{1,3}$	4	$Q_{2,0}$	9
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	6
$Q_{2,3}$	5	$Q_{0,1}$	14
$Q_{3,1}$	5	$Q_{0,2}$	5
$Q_{3,2}$	9	$Q_{0,3}$	10

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i への空気移動

表 5-54 2 次実測のハイブリッド換気条件における換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	14	0.18
ZONE2	5	0.17
ZONE3	10	0.24
全体	29	0.20

住戸全体では外気導入量による換気回数が 0.20 回/h を示した。実測対象住戸の北側に設置されている第 3 種ハイブリッド換気システム及び南壁面に設置されている 2 つの換気口では、建築基準法で規定されている必要換気回数 0.5 回/h に満たなかった。これは、ZONE3 に設置されている補助ファンのメンテナンス不足により、十分な排気量を得ることができなかったことが原因と考えられる。

ZONE1 では、外気導入量による換気回数が 0.18 回/h を示した。ZONE1 にはハイブリッド換気システムの給気口が設置されておらず、南壁面に 2 つの換気口が設置されているだけである。ZONE3 から ZONE1 への空気の流出入も少なかった。

ZONE2 では、外気導入量による換気回数が 0.17 回/h を示した。ハイブリッド換気システムによる給気口の効果と考えられるが、十分な外気導入は得られなかった。

ZONE3 では、外気導入量による換気回数が 0.24 回/h を示した。排気が行われる補助ファンのメンテナンス不足により十分な排気量が得られていなかった。

排気力が充分でないため、ZONE1・ZONE2 から ZONE3 へ流入されると空気の割合が 1 次実測に比べ大幅に減少した。

常時第3種換気条件

常時第3種換気条件における各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表5-55に示す。また、各ゾーン間の空気交換量を表5-56に、換気量算出結果を表5-57に示す。

表5-55 2次実測の常時第3種換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE 1	34.31	0.71	0.23	558.3	10.9	4.3
ZONE 2	9.56	32.75	0.39	156.1	508.2	7.5
ZONE 3	17.54	5.52	2.20	285.6	85.5	41.9

表5-56 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	5
$Q_{1,3}$	19	$Q_{2,0}$	5
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	32
$Q_{2,3}$	6	$Q_{0,1}$	21
$Q_{3,1}$	3	$Q_{0,2}$	5
$Q_{3,2}$	6	$Q_{0,3}$	15

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i への空気移動

表5-57 換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	21	0.27
ZONE2	5	0.19
ZONE3	15	0.36
全体	42	0.28

住戸全体では外気導入量による換気回数が 0.28 回/h となった。補助ファンのメンテナンス不足により、排気量が充分ではなかったことが考えられるが、ファンが常に稼動しているため、ハイブリッド換気に比べると外気導入量が増加した。

ZONE1 では、外気導入量による換気回数が 0.27 回/h を示し、ハイブリッド換気条件よりも高い値となった。ハイブリッド換気条件に比べて、外気導入量が増加した反面、排気量が減少した。ZONE3 でファンが常に稼動しており、ZONE1 の換気口からは排気ではなく給気が行われていたことが分かった。

ZONE2 では、外気導入量による換気回数が 0.19 回/h を示した。ZONE2 には給気口が設置されているが、給気が優勢であることは認められなかった。隣接した ZONE3 で補助ファンが常に稼動しており、ZONE2 に給気された空気は ZONE3 へと流出することが予想されたが、結果では ZONE2 での流入・流出量は殆ど同じで、ZONE3 の排気ファンの排気能力が低下しことが原因と推測される。

ZONE3 では、外気導入量による換気回数が 0.36 回/h を示した。補助ファンを常時稼動したことにより、ハイブリッド換気時に比べて ZONE3 の排気量が増加した。室内空気は他のゾーンから ZONE3 へ流入する換気性状となった。

自然換気条件

自然換気条件における各ゾーンでのサンプラー捕集量及び気中濃度算出結果を表 5-58 に示す。
また、各ゾーン間の空気交換量を表 5-59 に、換気量算出結果を表 5-60 に示す。

表 5-58 2 次実測の自然換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度

	捕集量 [μg]			気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE 1	40.69	4.79	2.23	663.4	74.1	42.5
ZONE 2	14.23	46.26	1.37	232.6	718.6	26.1
ZONE 3	14.56	9.07	4.89	237.7	140.6	93.1

表 5-59 各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]

$Q_{1,2}$	-	$Q_{1,0}$	16
$Q_{1,3}$	6	$Q_{2,0}$	5
$Q_{2,1}$	-	$Q_{3,0}$	1
$Q_{2,3}$	3	$Q_{0,1}$	11
$Q_{3,1}$	11	$Q_{0,2}$	1
$Q_{3,2}$	7	$Q_{0,3}$	11

$Q_{i,j}$: ZONE i から ZONE j への空気移動

$Q_{0,i}$: 外気から ZONE i への空気移動

表 5-60 2 次実測の自然換気条件における換気量算出結果

	外気導入量 [m^3/h]	換気回数 [回/h]
ZONE1	11	0.14
ZONE2	1	0.04
ZONE3	11	0.25
全体	23	0.15

住戸全体では外気導入量による換気回数が 0.15 回/h を示した。ハイブリッド換気条件と比べて、補助ファンを停止しているために排気量が少なくなった。しかしながら、ハイブリッド換気条件と比較して、外気導入量は僅かの減少に留まり、この結果から機械換気設備の換気性能低下が確認された。

この結果より、ZONE1 では外気導入量による換気回数が 0.14 回/h を示しハイブリッド換気時と同程度の値となった。ハイブリッド換気条件時の補助ファンは性能が低下し、補助ファンは ZONE1 の外気導入量にあまり影響を与えていなかったと考えられる。また、ZONE3 に給気された空気は ZONE1 の換気口を通して排気される傾向が強かった。

ZONE2 では、外気導入量による換気回数が 0.04 回/h という低い値を示した。給気口からの外気導入は殆どなく、ZONE3 から流入される交換空気の量が多かった。

ZONE3 では、外気導入量による換気回数が 0.25 回/h となった。補助ファンを停止したにも関わらず、ハイブリッド換気時と比べて殆ど変わらない値となった。このことから、本実測における自然換気を併用するハイブリッド換気システムは、1 年前の実測と比較してメンテナンス不足により設備の換気性能が低下し、自然換気条件と同程度の換気量しか確保できなかったことが分かった。

3 条件の比較

各換気条件下での PFT 法による換気量測定結果を表 5-61 に示す。また、各換気条件におけるゾーン間空気交換量及び外気導入量の関係図を図 5-27 に示す。

表 5-61 外気導入量及び換気回数算出結果

	外気導入量 [m ³ /h]				換気回数 [回/h]			
	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3
ハイブリッド	29	14	5	10	0.20	0.18	0.17	0.24
常時第3種	42	21	5	15	0.28	0.27	0.19	0.36
自然換気	23	11	1	11	0.15	0.14	0.04	0.25

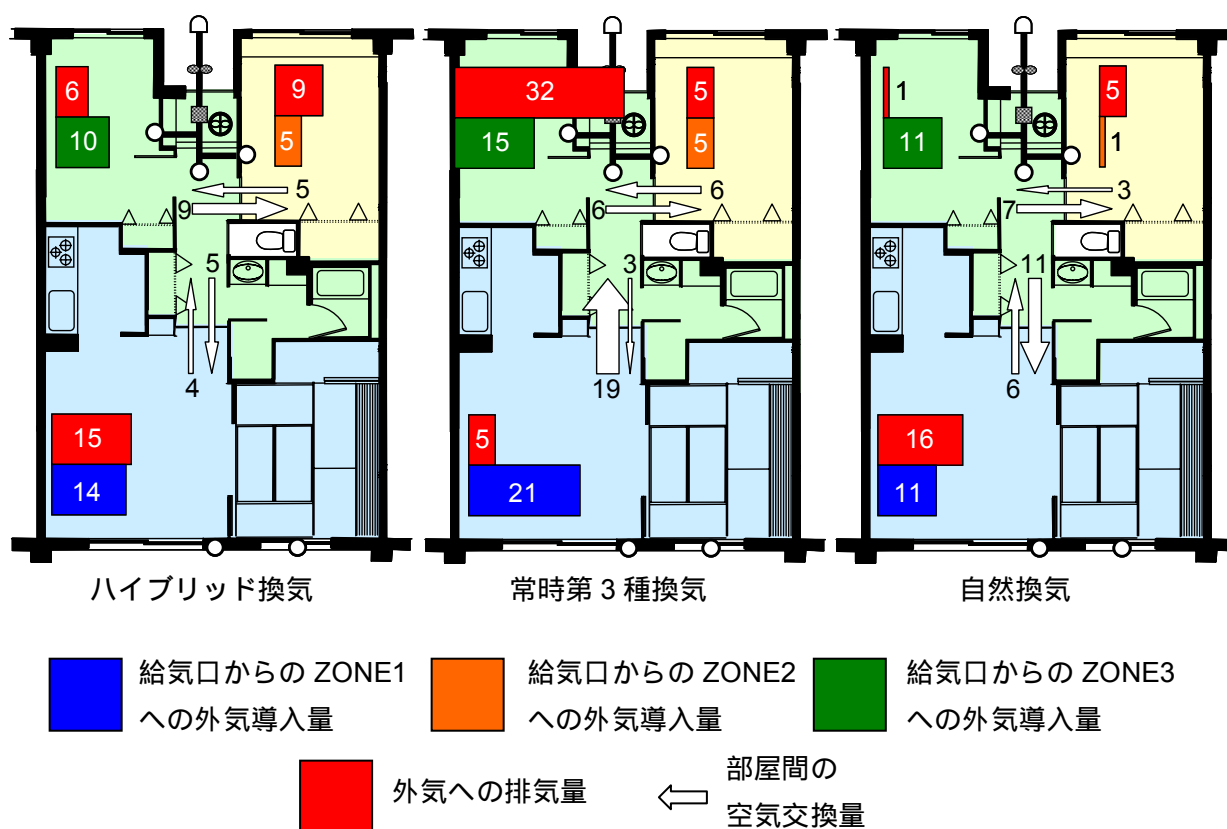


図 5-27 2 次実測の PFT 法によるゾーン間空気交換量及び外気導入量 [m³/h]

最も多い換気量を示した常時第3種換気条件は住戸全体が、常時稼動の補助ファンによる排気力が優勢になった。そのため、排気量はZONE3が殆どを占め、ZONE1の換気口から排気は殆ど行われなかった。

ハイブリッド換気と自然換気の結果を比較すると、大きな差は見られなかった。ハイブリッド換気は自然風が弱い時には補助ファンにより排気されるため、自然換気より外気導入量が多くなるが、ファンの排気性能低下により、十分な換気ができない状態であった。

ZONE1の外気導入量や排気量は外気の風速・風向に影響されるが、ZONE3の排気ファンの排気力にも大きく依存する。ZONE3の排気ファンからの排気量が多い時はZONE1は給気ゾーンとなるが、排気ファンの性能が低下したり自然換気条件になると、ZONE1は排気ゾーンとなり、空気齢の古い空気が他室から流入するゾーンとなった。

いずれの条件においてもZONE2からの給排気量は少なかった。特に、ZONE3の排気ファンが性能を発揮できない状況ではZONE2への外気導入量が減少し、空気が淀んでしまう好ましくない空気環境となることが予想される。

住戸全体の換気回数は常時第3種換気>ハイブリッド換気>自然換気の順に減少する結果となった。しかし、全ての換気条件において建築基準法で規定されている必要換気回数0.5回/hより小さい結果となったのは、1次実測と異なる傾向であった。「ハイブリッド換気・常時第3種換気条件」と「自然換気条件」との換気量の差が小さく、換気設備の性能低下が推測された。原因としては、約1年間換気設備の整備を行わなかったため、補助ファン及び換気口が目詰まりなどシステム全体の換気性能低下が考えられた。

(3) SF₆を用いた換気量測定結果

SF₆法による各換気条件及び各ゾーンにおける平均外気導入量及び換気回数算出結果を表 5-62 に示す。換気量算定には PFT 法の捕集時刻に合わせた期間の測定結果を用いた。

表 5-62 2 次実測の SF₆法による平均外気導入量及び換気回数算出結果

	外気導入量 [m ³ /h]				換気回数 [回/h]			
	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3
ハイブリッド	18	7	6	5	0.12	0.09	0.22	0.11
常時第 3 種	35	15	8	12	0.23	0.19	0.28	0.28
自然換気	16	3	5	8	0.11	0.04	0.17	0.19

ZONE1 のハイブリッド換気、自然換気時において一定濃度法による測定ができておらず、正確な外気導入量の算出結果が得られなかった。そのため ZONE1 のハイブリッド換気、自然換気時にはステップダウン法を用いて外気導入量を算出した。

(4) CO₂を用いた換気量測定結果

CO₂法による平均外気導入量及び換気回数算出結果を表 5-63 に示す。換気量算定には PFT 法の捕集時刻に合わせた期間の測定結果を用いた。

表 5-63 2 次実測の CO₂法による平均外気導入量及び換気回数算出結果

	外気導入量 [m ³ /h]				換気回数 [回/h]			
	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3	全体	ZONE1	ZONE2	ZONE3
ハイブリッド	27	12	6	9	0.18	0.16	0.21	0.20
常時第 3 種	36	22	6	8	0.24	0.28	0.21	0.17
自然換気	18	8	3	6	0.12	0.11	0.12	0.13

(5) 測定法による比較

表 5-64 に各測定法による換気量測定結果を示す。結果値は PFT 法の捕集が行われていた時間帯の平均換気量である。

表 5-64 2 次実測の各測定法による換気量測定結果

			ハイブリッド換気	常時第 3 種換気	自然換気
Z O N E 1	外気導入量 [m ³ /h]	PFT	14	21	11
		SF ₆	7	15	3
		CO ₂	12	22	8
	換気回数 [回/h]	PFT	0.18	0.27	0.14
		SF ₆	0.09	0.19	0.04
		CO ₂	0.16	0.28	0.11
Z O N E 2	外気導入量 [m ³ /h]	PFT	5	5	1
		SF ₆	6	8	5
		CO ₂	6	6	3
	換気回数 [回/h]	PFT	0.17	0.19	0.04
		SF ₆	0.22	0.28	0.17
		CO ₂	0.21	0.21	0.12
Z O N E 3	外気導入量 [m ³ /h]	PFT	10	15	11
		SF ₆	5	12	8
		CO ₂	9	8	6
	換気回数 [回/h]	PFT	0.24	0.36	0.25
		SF ₆	0.11	0.28	0.19
		CO ₂	0.20	0.17	0.13
住 戸 全 体	外気導入量 [m ³ /h]	PFT	29	42	23
		SF ₆	14	35	16
		CO ₂	27	36	18
	換気回数 [回/h]	PFT	0.20	0.28	0.15
		SF ₆	0.10	0.23	0.11
		CO ₂	0.18	0.24	0.12

SF₆ と CO₂ の変動はほぼ同じ傾向を示した。PFT 法を用いた換気量測定結果と SF₆、CO₂ を用いた測定から得られた時間平均換気量は近い値を示した。

外気導入量の変動が大きかった常時第 3 種換気、自然換気においても、それぞれの結果は近い値を示した。これにより、変動する外気導入量の平均値を PFT 法により把握することが可能であると判断された。

但し、各ゾーンにおける測定結果には測定法の違いによるバラツキが見られた。単一ガスを用いて室間空気交換量を求めることは誤差を多く含むことになるため、単純比較は難しい。複数ゾーンにおけるゾーン間空気交換量を求める際にはマルチガス法 (Multi-tracergas Method) を用いる必要があり、室間空気交換量を把握する際には PFT 法が適していると考えられる。

5.5.8 1次実測と2次実測のPFT換気量測定結果の比較

PFT法を用いて行った2004年度の1次実測結果と2005年度の2次実測結果の比較を表5-65に示す。

表5-65 PFT法による1次実測と2次実測結果

		外気導入量 [m ³ /h]		換気回数 [回/h]	
		1次実測	2次実測	1次実測	2次実測
ハイブリッド 換気	ZONE1	16	14	0.20	0.18
	ZONE2	12	5	0.42	0.17
	ZONE3	40	10	0.93	0.24
	住戸全体	67	29	0.45	0.20
常時第3種 換気	ZONE1	15	21	0.19	0.27
	ZONE2	9	5	0.33	0.19
	ZONE3	75	15	1.75	0.36
	住戸全体	99	42	0.68	0.28
自然換気	ZONE1	2	11	0.03	0.14
	ZONE2	7	1	0.24	0.04
	ZONE3	27	11	0.63	0.25
	住戸全体	36	23	0.24	0.15

いずれの条件においても1次実測結果より2次実測結果の外気導入量が減少しており、特にハイブリッド換気条件と常時第3種換気条件では大幅に減少していた。また、給気口2箇所と排気ファンが設置されているZONE3において、外気導入量が大幅に減少した。

1次実測以降、住宅は使用されておらず、約1年間換気設備は稼動していなかった。そのため外壁部分の換気口、外気導入口に設けられたフィルターに粉塵が蓄積し、また排気ファンのメンテナンス不足による性能低下によって換気能力が低下したことが明らかになった。

5.5.9 測定結果まとめ

第3種ハイブリッド換気システムが設置された集合住宅における多数室換気実測では、住戸を3つのゾーンに分け、ZONE1には C_6F_6 、ZONE2に C_7F_8 、ZONE3に C_7F_{14} を放散させ測定を行った。1次実測を行った1年後に2次実測を行った。換気量測定法としては1次実測ではPFT法のみを、2次実測ではPFT法、 SF_6 法、 CO_2 法を用いた。

本実測から得られた結果を以下にまとめる。

(1) 1次実測結果

- 1) 1次実測の結果、各換気条件における換気回数は、常時第3種換気0.68回/h、ハイブリッド換気0.45回/h、自然換気0.24回/hとなり、ハイブリッド換気システムで必要換気量に近い換気量が確保できることが分かった。
- 2) いずれの換気条件でも、ZONE3>ZONE2>ZONE1の順に外気導入量による換気回数が減少する傾向を示した。
- 3) 常時第3種換気時は、補助ファンがあるZONE3で他のゾーンから流入した空気が排気され、またZONE3に直接流入する外気導入量も多くなった。
- 4) ハイブリッド換気は常時第3種換気と自然換気の中間的換気性状を示し、ZONE3で排気される量とZONE1で排気される空気の量が近い値となった。
ZONE1での給気量は常時第3種換気とハイブリッド換気で差は小さく、ハイブリッド換気システムがより望ましい空気環境を形成していることが分かった。
- 5) 自然換気条件では、ZONE3から外気導入が、ZONE1の換気口から排気が行われ、他のゾーンからZONE1へ流入し、ZONE1の換気口から排気される空気の割合が常時第3種換気に比較して増加していた。一方、補助ファンが稼働しているハイブリッド換気、常時第3種換気時は補助ファンの排気力が大きく、ZONE3からの排気量が最も多かった。
また、いずれの換気条件においてもZONE2からの排気量は少なく、外気から導入された空気はZONE3へ流れる換気性状となった。
- 6) ZONE3では過換気、ZONE1では換気不足と、住戸全体ではバランスのよくない換気性状となっていた。また、ZONE1には他のゾーンから空気が流れ込むため、古い空気齢の空気が入ってくる空気環境となっていた。

(2) 2 次実測結果

- 1) 2 次実測の結果、住戸全体の換気回数は常時第 3 種換気 0.28 回/h、ハイブリッド換気 0.20 回/h、自然換気 0.15 回/h となり、常時第 3 種換気条件及びハイブリッド換気条件共に必要換気回数 0.5 回/h を満たしていなかった。1 次実測結果に比べ、全条件において換気量が大幅に減少し、その原因として給排気口及び排気ファンのメンテナンス不足による換気性能低下が考えられた。
- 2) 常時第 3 種換気時は、常時稼働の補助ファンにより排気は ZONE3 で殆ど行われ、ZONE1 からの排気は少なかった。
- 3) ハイブリッド換気と自然換気の結果を比較すると、外気導入量において ZONE1、ZONE3 では大きな差はなく、ZONE2 において外気導入量が少なかった。ハイブリッド換気は自然風が弱い時には補助ファンにより排気されるため、自然換気より外気導入量が多くなるが、システムの性能低下が原因と考えられる。
- 4) いずれの条件においても ZONE2 からの排気は少なかった。ZONE3 の排気ファンからの排気量が多い場合、ZONE1 は給気ゾーンとなるが、排気ファンの性能が低下すると ZONE1 は排気ゾーンとなり、空気齢の古い空気が他室から流入するゾーンとなった。
- 5) 換気量測定法による比較では、各換気条件における住戸全体の換気量測定結果は PFT 法 > CO₂ 法 > SF₆ 法の順に小さくなった。

ハイブリッド換気条件では PFT 法 0.20 回/h、CO₂ 法 0.18 回/h に比べ SF₆ 法が 0.10/h と少ない結果となった。しかし、常時第 3 種換気及び自然換気条件では PFT 法、CO₂ 法、SF₆ 法の 3 測定法は同等な測定結果を示した。

PFT 法は CO₂ 法、SF₆ 法と同等な測定精度が得られた。

5.6 3階建戸建住宅における換気量測定

5.6.1 目的

本実測では、縦方向にゾーン分けをし、垂直空間における PFT 法の換気量測定精度及び適用可能性について検討した^{17)~22)}。また、測定対象住宅に設けられている2種類の第3種セントラル換気システムの換気能力及び住戸内での換気性状の把握を行った。換気量測定法としては PFT 法(1次・2次実測)、CO₂一定発生法(1次実測のみ)、風量測定法(1次・2次実測)の3種類の測定法を用いた。

5.6.2 測定概要

A社の住宅性能試験場内の第3種セントラル方式の換気設備が備えられた3階建戸建住宅において実測を行った。C値(相当隙間面積)は4.25cm²/m²である。

実測期間は2006年8月22日～8月29日(以下、1次実測)及び10月2日～10月5日(以下、2次実測)である。測定対象住宅には、M社製第3種セントラル換気システムとG社製第3種セントラル換気システムの2種類の換気設備が備えられている。

M社製は1、2階には個別排気扇、3階にはダクト式セントラル換気システムが設置されており、G社製は1階で換気システムが1台、2・3階で1システムと計2台のダクト式セントラル換気システムが設置されている。

測定対象住宅の各階を1つのゾーンとして3ゾーン(1階-ZONE1、2階-ZONE2、3階-ZONE3)に分け、CO₂、PFTをトレーサースガスとして換気量測定を行った。また、換気量に影響を与える風向、風速を気象観測機器を用いて測定した。

1次実測では換気条件を「条件①：M社製第3種換気条件、条件②：M社製第3種換気システム停止-1・2階排気ファン稼働条件、条件③：G社製第3種換気条件、条件④：自然換気条件」の4条件を、2次実測では「条件①、条件②」の2条件を設けた。

測定期間中はエアコンを24時間設定とし常時稼働させた。

実測項目を表5-66に、実測条件を表5-67に、床面積・容積を表5-68に、試験棟外観及び平面図を図5-28に、換気口の写真を図5-29に示す。また、2社の第3種セントラル換気ファンの位置・ダクト配管図を平面図・断面図共に図5-30に示す。

表 5-66 3 階建戸建住宅の実測項目

実測項目		測定機器	
外気導入量 空気交換量	PFT 法	Tracer gas	C ₆ F ₆ 、C ₇ F ₈ 、C ₇ F ₁₄
		放散源	クリンプバイアル瓶
		サンプラー	パッシブガスチューブ（SIBATA 社製）
		放散量計量	電子天秤（AandD 社製 GR-300）
外気導入量	CO ₂ 法 （1 次実測のみ）	Tracer gas	CO ₂ ボンベ
		測定機器	多数室換気測定器 （コーナー札幌社製 SK-001）
		データ収録	パソコン 1 台
		拡散機器	扇風機 11 台
風量測定		風量測定器（コーナー札幌社製 KNS-300）	
外乱（風向・風速）		気象観測機器	
温湿度		メモリー式温湿度計 （TABAI ESPEC THERMO RECORDER RS-11）	
差圧 測定	外壁面差圧	マルチレンジ微差圧センサー260-1MS3 6 台	
	データロガー	HIOKI メモリハイロガー8241-50 1 台	
	差圧データ収録	パソコン 1 台	

表 5-67 3 階建戸建住宅の実測条件 : 稼動 × : 停止

	換気状態	1 階	2 階	3 階
条件	M 社第 3 種換気			
条件	M 社第 3 種換気			×
条件	G 社第 3 種換気			
条件	自然換気	×	×	×

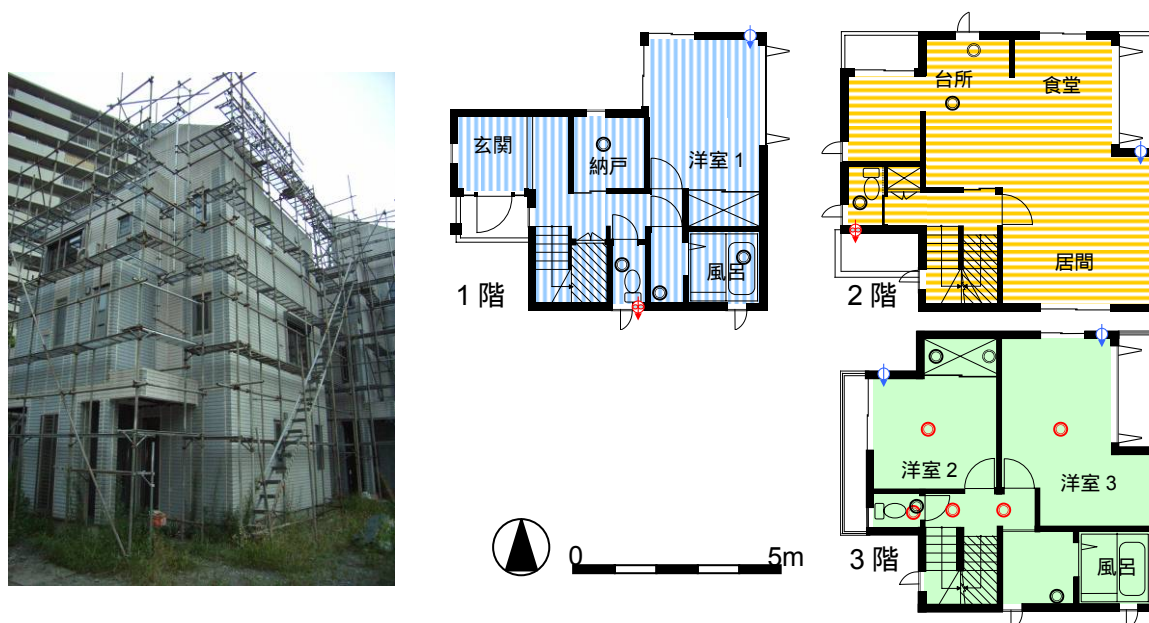


図 5-28 3 階建戸建住宅の外観及び平面図



図 5-29 換気ファン及び換気口

表 5-68 3 階建戸建住宅の床面積及び容積

	1 階	2 階	3 階	ペントハウス	全体
床面積 [m ²]	33	39	37	5	115
容積 [m ³]	80	94	89	12	276

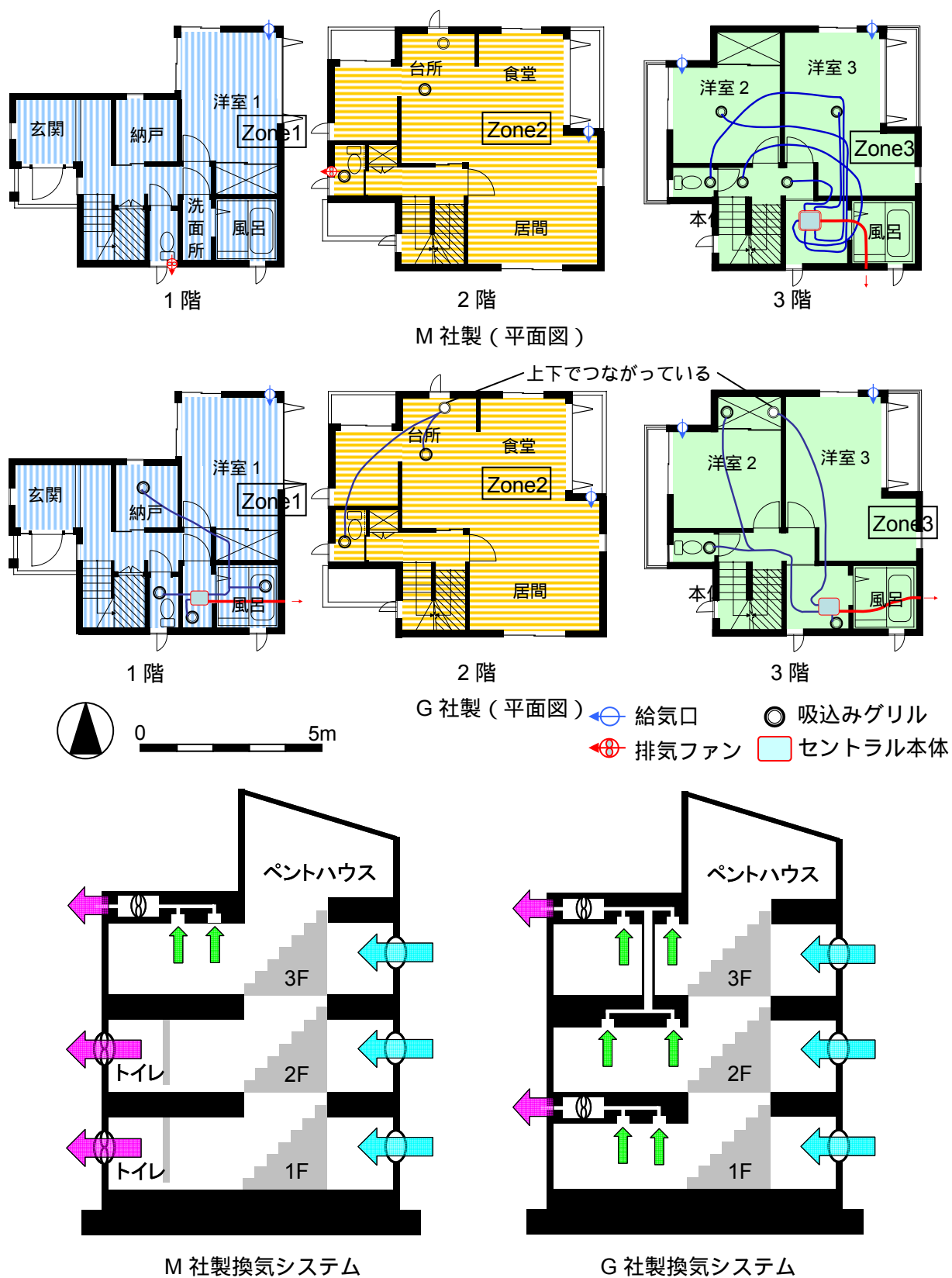


図 5-30 第3種セントラル換気システムの概要

5.6.3 測定法概要

(1) PFT 一定発生法を用いた換気量測定

PFT (Perfluorocarbon Tracergas) 法を用いた換気量測定では、トレーサーガスとして C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} を用いて測定を行った。シリコン膜を放散膜として使用した PFT 放散源を作製し、液体の PFCs を充填した。クリンプバイアルを用いた PFT 放散源の概要図を図 5-31 に示す。

C_6F_6 、 C_7F_8 には、それぞれ直径 2.0mm、3.0mm の穴を開けたアルミ板をシリコン膜の上下に置いて放散量を調節した。但し、1 本当りりの放散量を減らして PFT 放散源の設置数を増やすために、2 次実測の C_6F_6 には 5.0mm 厚のシリコン膜を用いた。 C_7F_{14} には 1.0mm 厚のシリコン膜のみを用いた。

また、PFT を捕集するパッシブサンプラーとして、パッシブガスチューブを使用した。パッシブサンプラーは回収後、溶媒抽出し GC/MS により定性定量を行った。

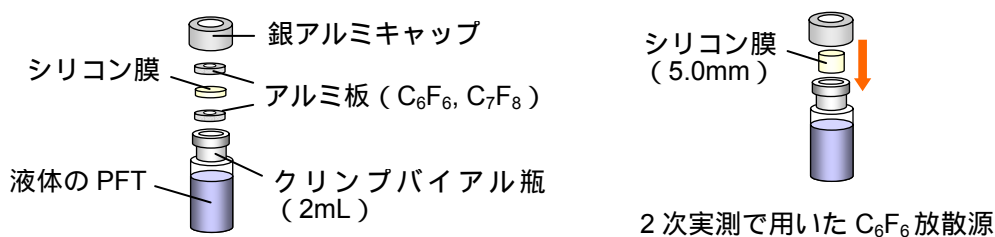


図 5-31 バイアルを用いた PFT 放散源概要図

1 階を ZONE 1、2 階を ZONE 2、3 階及びペントハウスを ZONE 3 とした。PFT の室内空間での混合効率を高めるために、PFT 放散源を給気口付近に設置し、攪拌ファンを用いてゾーン内を攪拌した。放散源は、ZONE 1 に C_6F_6 を 3 本、ZONE 2 に C_7F_8 を 4 本、ZONE 3 に C_7F_{14} を 6 本設置した。

捕集用サンプラーは、ZONE 1 は洋室 1 と階段付近および洗面所に計 3 本、ZONE 2 は居間、台所および階段付近に計 3 本、ZONE 3 は洋室 2、洋室 3 と洗面所および階段付近に計 4 本を設置した。測定は換気条件 ～ において行った。

(2) CO₂一定濃度法を用いた換気量測定

CO₂法は1次実測のみに用いた。多数室換気測定器（SK-001、コーナー札幌社製）を用いて、トレーサーガスとしてCO₂を放散させて換気量を測定した。ターゲット濃度は2000ppmに設定した。多数室換気測定器は多点におけるCO₂濃度を測定することができるため、本実測では各ゾーンにドーザーとサンプラーを設置し、各ゾーンにおける外気導入量及び住宅全体での外気導入量を測定した。

ZONE 1はドーピングポイントとサンプリングポイントを3箇所ずつ、ZONE 2は2箇所ずつ、ZONE 3は3箇所ずつ設けた。

測定周期は18分（チャンネル毎にドーピング1分、サンプリング1分、室内濃度測定8チャンネル＋外気濃度測定1チャンネル）とした。

(3) 風量測定

各排気口及び吸込みグリルに直接装着することにより風量を測定することができる風量測定器（KNS-300、コーナー札幌社製）を用いた。室内のドアを開放し、M社第3種換気条件、G社第3種換気条件における各排気口及び吸込みグリルの風量を計測した。1次実測では8月2日に事前測定を、2次実測では実測期間中に測定を行った。また、2次測定では排気口の屋外側の風量も測定した。

(4) 温湿度測定

自然換気は室内と外気の温度差によって生じるため、メモリー式温湿度計を用いて室内外の温湿度を測定した。また、PFT法において、PFTのサンプリングレイトは温度に影響を受けるため、サンプラー近傍に設置し、温湿度測定を行った。

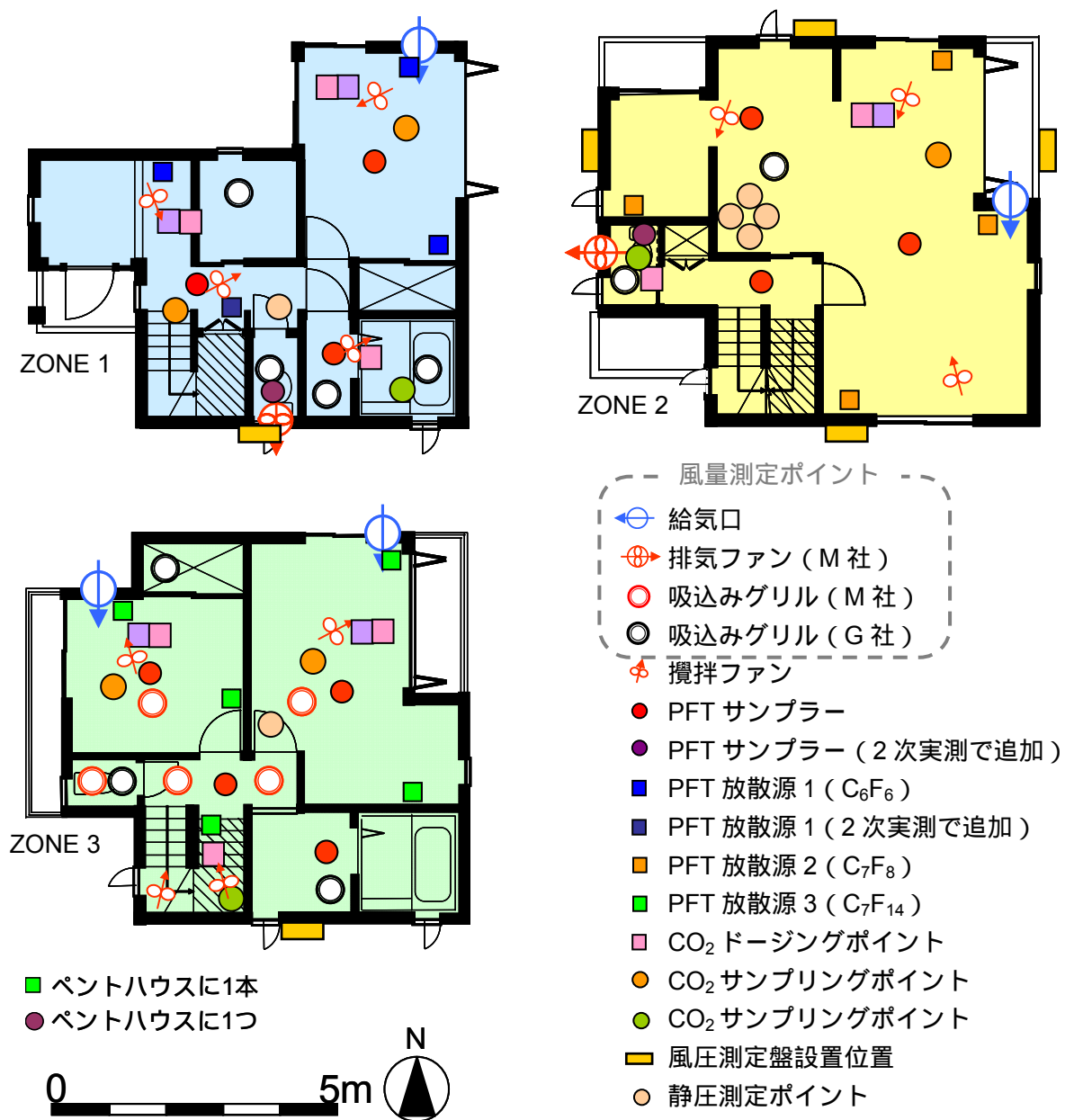


図 5-32 換気量測定器具設置図

5.6.4 1次実測結果

(1) 温湿度測定結果

室内外の温湿度を、メモリー式温湿度計を用いて測定した。各条件における測定期間中の平均温湿度、最高温度、最低温度を表 5-69 に示す。

表 5-69 温湿度測定結果（1次実測）

測定箇所			平均温度 [°C]	最高温度 [°C]	最低温度 [°C]	平均湿度 [%RH]
条 件	ZONE 1	1F 洋室 1	24.2	24.7	23.7	74
		1F 廊下	25.1	25.5	24.8	69
		1F 風呂	24.5	24.9	24.2	72
	ZONE 2	2F 居間	23.4	24.0	22.9	65
		2F 廊下	23.9	24.5	23.4	64
		2F 台所	24.4	25.6	23.9	61
	ZONE 3	3F 風呂	24.0	24.3	23.5	70
		3F 廊下	25.1	25.9	24.4	65
		3F 洋室 2	24.3	25.0	23.9	65
		3F 洋室 3	23.4	23.9	22.8	74
		ペントハウス	26.5	28.5	25.3	58
	外気		28.9	33.1	26.2	69
条 件	ZONE 1	1F 洋室 1	23.9	24.6	23.5	67
		1F 廊下	25.6	25.9	25.4	59
		1F 風呂	24.5	24.8	24.1	65
	ZONE 2	2F 居間	23.0	23.7	22.3	64
		2F 廊下	23.9	24.3	23.5	62
		2F 台所	24.4	24.5	23.6	60
	ZONE 3	3F 風呂	24.1	24.5	23.7	71
		3F 廊下	25.1	25.7	24.6	67
		3F 洋室 2	24.5	24.7	23.9	67
		3F 洋室 3	23.4	23.9	22.8	76
		ペントハウス	26.6	28.3	25.5	61
	外気		29.0	32.8	26.0	75

測定箇所			平均温度 [°C]	最高温度 [°C]	最低温度 [°C]	平均湿度 [%RH]
条件	ZONE 1	1F 洋室 1	23.9	24.4	23.5	74
		1F 廊下	25.0	26.1	24.8	68
		1F 風呂	24.5	24.8	24.2	72
	ZONE 2	2F 居間	23.0	23.7	22.3	70
		2F 廊下	23.8	24.2	23.4	68
		2F 台所	24.0	25.2	23.8	66
	ZONE 3	3F 風呂	24.0	24.4	23.6	74
		3F 廊下	24.7	25.4	24.2	70
		3F 洋室 2	24.3	25.6	24.1	68
		3F 洋室 3	23.3	23.8	22.8	80
		ペントハウス	26.4	28.0	25.5	63
	外気		26.0	29.2	23.6	72
条件	ZONE 1	1F 洋室 1	24.1	24.5	23.6	72
		1F 廊下	24.8	25.6	24.7	68
		1F 風呂	23.1	23.5	22.5	75
	ZONE 2	2F 居間	23.7	24.0	23.3	73
		2F 廊下	24.5	24.8	24.2	71
		2F 台所	24.0	25.2	23.8	69
	ZONE 3	3F 風呂	24.0	24.3	23.6	74
		3F 廊下	24.6	25.1	24.3	70
		3F 洋室 2	24.4	25.5	24.0	67
		3F 洋室 3	23.3	24.0	22.8	79
		ペントハウス	25.2	26.0	24.6	69
	外気		26.6	30.4	24.6	72

エアコンを常時運転としたため、ペントハウスを除き、どの測定ポイントにおいても 24 前後となっていた。また、室内温度の日変動は少なかった。

しかし、ペントハウスにおいて、どの条件化においても平均温度が 3F の測定点の平均温度を 1.5～3 上回っており、また、条件 ～ においては±3 の変動があった。

外気温に比べて室内の温度は、全条件において 4～5 下回る結果となった。

(2) 風量測定結果

各排気口及び吸込みグリルに風量測定器を直接装着し計測を行った。室間のドアを開放し、M社第3種換気条件、G社第3種換気条件で行った。各測定点における風量測定結果および、設計風量を表5-70に示す。

表 5-70 風量（排気量）測定結果（1次実測）

M 社製換気システム			
	測定場所	排気量 [m ³ /h]	設計値 [m ³ /h]
ZONE 1	トイレ	29	38
ZONE 2	トイレ	32	38
ZONE 3	洋室 2	19	-
	洋室 3	20	
	トイレ	19	
	階段	16	
	廊下	21	
	小計	95	100
住戸全体		154	174

G 社製換気システム			
	測定場所	排気量 [m ³ /h]	設計値 [m ³ /h]
ZONE 1	納戸	12	-
	トイレ	18	
	風呂	18	
	洗面所	16	
	小計	64	60
ZONE 2	台所	15	-
	トイレ	24	
	小計	39	
ZONE 3	洋室 2	16	
	トイレ	22	
	洗面所	31	
	小計	69	
ZONE 2, 3 合計		108	100
住戸全体		172	160

M 社製第3種セントラル換気システムにおいて、ZONE 1、ZONE 2 では、実測値が設計排気量を若干下回っており、ZONE 3 においては、設計風量に近い結果となった。住戸全体での排気量は設計排気量を 11% 下回る結果となった。

G 社製第3種セントラル換気において、ZONE 1 では、各排気口での実測排気量合計値は設計排気量に近い値を示しており、またどのダクトにおいてもバランスよく排気が行われていた。ZONE 2、ZONE 3 においても、実測値は設計排気量に近い値を示していた。

ZONE 1、ZONE 2 ではG 社製換気システムがM 社製換気システムの排気風量を若干上回ったが、ZONE 3 では下回る結果となった。住戸全体での排気量は設計排気量を G 社製が M 社製を 10% 程度上回る結果となったが、換気システムによる差異は少なく、また両システム共に設計値に等し

い排気風量性能を有していることが確認できた。

しかし、給気口からの導入風量は全ての給気口において $1\text{m}^3/\text{h}$ 以下の値となり、専用の給気口からの外気導入が殆ど行われていないことが分かった。給気口は汚れや目詰まりはなく、室内側に設置されているフィルターを外したところ導入風量が増加したため、フィルターの圧力損失が主な原因と推察された。

(3) PFT 法を用いた換気量測定結果

(a) 条件 (M 社製第3種換気条件)

測定期間は8月22日17:30～8月23日17:30までである。測定時における各ゾーンのPFTの放散量・放散速度を表5-71に、サンプラー捕集量及び気中濃度を表5-72に示す。

表 5-71 条件 における PFT 放散量及び放散速度 (1 次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C_6F_6	洋室 1 北	0.102	4.242
		洋室 1 東	0.131	5.442
		玄関	0.130	5.417
		合計	0.362	15.100
ZONE 2	C_7F_8	食堂	0.026	1.075
		居間 東	0.024	0.979
		居間 南	0.027	1.108
		台所 西	0.031	1.275
		合計	0.107	4.438
ZONE 3	C_7F_{14}	洋室 3 北	0.035	1.479
		洋室 3 東	0.044	1.846
		階段	0.032	1.333
		洋室 2 西	0.046	1.921
		洋室 2 東	0.020	0.838
		ペントハウス	0.024	0.983
		合計	0.202	8.400

表 5-72 条件 におけるサンプラー捕集量及び気中濃度（1 次実測）

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE 1	風呂	16.48	2.25	0.70	273.0	35.4	13.5
	洋室 1	15.45	1.90	0.65	256.2	30.0	12.7
	廊下	14.56	2.23	0.82	240.5	35.0	15.7
	平均値	15.15	2.12	0.74	250.8	33.3	14.3
ZONE 2	居間	12.87	4.18	1.41	214.1	66.0	27.4
	廊下	10.78	3.45	1.34	179.0	54.4	26.0
	台所	12.89	4.38	1.45	214.4	69.2	28.0
	平均値	12.43	4.08	1.41	206.5	64.4	27.3
ZONE 3	廊下	9.36	2.52	2.76	154.7	39.5	53.2
	風呂	9.09	2.35	2.89	150.8	37.1	55.9
	洋室 2	9.14	2.38	3.22	151.9	37.6	62.4
	洋室 3	8.63	2.28	2.92	143.5	36.1	56.6
	平均値	9.04	2.39	2.95	149.9	37.6	57.0

(b) 条件 (M社製第3種換気システム停止 - 1・2階排気ファン稼働条件)

測定期間は8月24日10:00～8月25日10:00とした。測定時における各ゾーンのPFTの放散量・放散速度を表5-73に、サンプラー捕集量及び気中濃度を表5-74にそれぞれ示す。

表5-73 条件 におけるPFT放散量及び放散速度(1次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C ₆ F ₆	洋室1 北	0.102	4.233
		洋室1 東	0.130	5.412
		玄関	0.131	5.442
		合計	0.362	15.087
ZONE 2	C ₇ F ₈	食堂	0.025	1.050
		居間 東	0.024	0.996
		居間 南	0.027	1.117
		台所 西	0.031	1.275
		合計	0.107	4.438
ZONE 3	C ₇ F ₁₄	洋室3 北	0.031	1.296
		洋室3 東	0.041	1.696
		階段	0.029	1.204
		洋室2 西	0.040	1.654
		洋室2 東	0.019	0.808
		ペントハウス	0.023	0.938
		合計	0.182	7.596

表5-74 条件 におけるサンプラー捕集量及びPFT気中濃度(1次実測)

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [μg/m ³]		
		C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄	C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄
ZONE 1	風呂	30.11	5.37	4.64	498.7	84.6	89.6
	洋室1	29.98	5.01	4.19	497.5	79.0	81.1
	廊下	25.99	5.11	4.23	429.3	80.2	81.6
	平均値	28.00	5.11	4.27	463.7	80.4	82.6
ZONE 2	居間	16.97	5.60	4.67	282.5	88.6	90.7
	廊下	16.70	5.47	5.14	277.1	86.3	99.5
	台所	16.04	5.62	4.32	267.0	88.9	83.9
	平均値	16.64	5.58	4.67	276.6	88.1	90.5
ZONE 3	廊下	10.30	2.68	6.31	170.4	42.2	121.8
	風呂	9.25	2.34	4.96	153.4	37.0	96.0
	洋室2	9.04	2.28	4.55	150.4	36.0	88.2
	洋室3	9.78	2.50	4.74	162.6	39.6	92.0
	平均値	9.65	2.47	5.17	160.1	39.0	100.0

(c) 条件 (G社製第3種換気条件)

測定期間は8月25日17:00～8月26日17:00とした。測定時における各ゾーンのPFTの放散量・放散速度を表5-75に、サンプラー捕集量及び気中濃度を表5-76にそれぞれ示す。

表5-75 条件 におけるPFT放散量及び放散速度(1次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C ₆ F ₆	洋室1 北	0.100	4.167
		洋室1 東	0.130	5.421
		玄関	0.127	5.283
		合計	0.357	14.871
ZONE 2	C ₇ F ₈	食堂	0.026	1.096
		居間 東	0.024	0.987
		居間 南	0.026	1.104
		台所 西	0.030	1.233
		合計	0.106	4.421
ZONE 3	C ₇ F ₁₄	洋室3 北	0.028	1.171
		洋室3 東	0.038	1.583
		階段	0.026	1.087
		洋室2 西	0.036	1.483
		洋室2 東	0.019	0.800
		ペントハウス	0.022	0.900
		合計	0.169	7.025

表5-76 条件 におけるサンプラー捕集量及びPFT気中濃度(1次実測)

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [μg/m ³]		
		C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄	C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄
ZONE 1	風呂	17.59	2.28	1.14	290.7	35.8	21.9
	洋室1	20.85	2.36	1.12	345.0	37.2	21.6
	廊下	14.88	2.29	1.43	245.7	35.9	27.5
	平均値	17.40	2.31	1.28	287.6	36.3	24.6
ZONE 2	居間	9.81	3.97	1.74	162.6	62.5	33.6
	廊下	8.56	3.43	1.84	141.7	54.0	35.6
	台所	10.64	4.68	1.89	176.3	73.7	36.6
	平均値	9.78	4.06	1.81	162.0	63.9	34.9
ZONE 3	廊下	7.87	2.68	3.87	129.9	42.1	74.5
	風呂	7.35	2.50	3.29	121.6	39.3	63.6
	洋室2	7.14	2.48	3.25	118.4	39.0	62.9
	洋室3	6.85	2.30	3.97	113.5	36.3	76.8
	平均値	7.29	2.49	3.65	120.6	39.1	70.5

(d) 条件 (自然換気条件)

測定期間は8月28日10:00～8月29日10:00である。測定時における各ゾーンのPFTの放散量・放散速度を表5-77に、サンプラー捕集量及び気中濃度を表5-78にそれぞれ示す。

表5-77 条件 におけるPFT放散量及び放散速度(1次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C ₆ F ₆	洋室 1 北	0.099	4.142
		洋室 1 東	0.126	5.242
		玄関	0.123	5.142
		合計	0.349	14.525
ZONE 2	C ₇ F ₈	食堂	0.026	1.075
		居間 東	0.026	1.075
		居間 南	0.029	1.204
		台所 西	0.029	1.200
		合計	0.109	4.554
ZONE 3	C ₇ F ₁₄	洋室 3 北	0.024	0.996
		洋室 3 東	0.033	1.371
		階段	0.023	0.958
		洋室 2 西	0.029	1.192
		洋室 2 東	0.019	0.787
		ペントハウス	0.021	0.879
		合計	0.148	6.183

表5-78 条件 におけるサンプラー捕集量及びPFT気中濃度(1次実測)

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [μg/m ³]		
		C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄	C ₆ F ₆	C ₇ F ₈	C ₇ F ₁₄
ZONE 1	風呂	53.78	12.32	10.13	890.8	193.9	195.8
	洋室 1	59.71	13.22	10.59	990.3	208.3	204.9
	廊下	47.70	11.52	11.21	789.2	181.0	216.3
	平均値	52.86	12.24	10.83	875.6	192.6	209.3
ZONE 2	居間	38.67	12.82	8.64	643.5	202.8	167.8
	廊下	37.33	12.31	9.41	620.0	194.3	182.3
	台所	39.51	13.26	14.55	657.6	209.7	282.6
	平均値	38.63	12.84	10.53	642.2	202.8	204.3
ZONE 3	廊下	29.91	9.37	10.38	495.2	147.5	200.4
	風呂	28.97	8.99	8.98	480.6	141.8	173.8
	洋室 2	28.90	8.94	11.90	480.6	141.2	230.8
	洋室 3	29.60	9.20	8.66	492.2	145.4	168.0
	平均値	29.41	9.15	10.05	487.9	144.2	194.5

(e) 各換気条件における換気量算出結果

各換気条件における PFT 法による換気量算出結果を図 5-33 に示す。

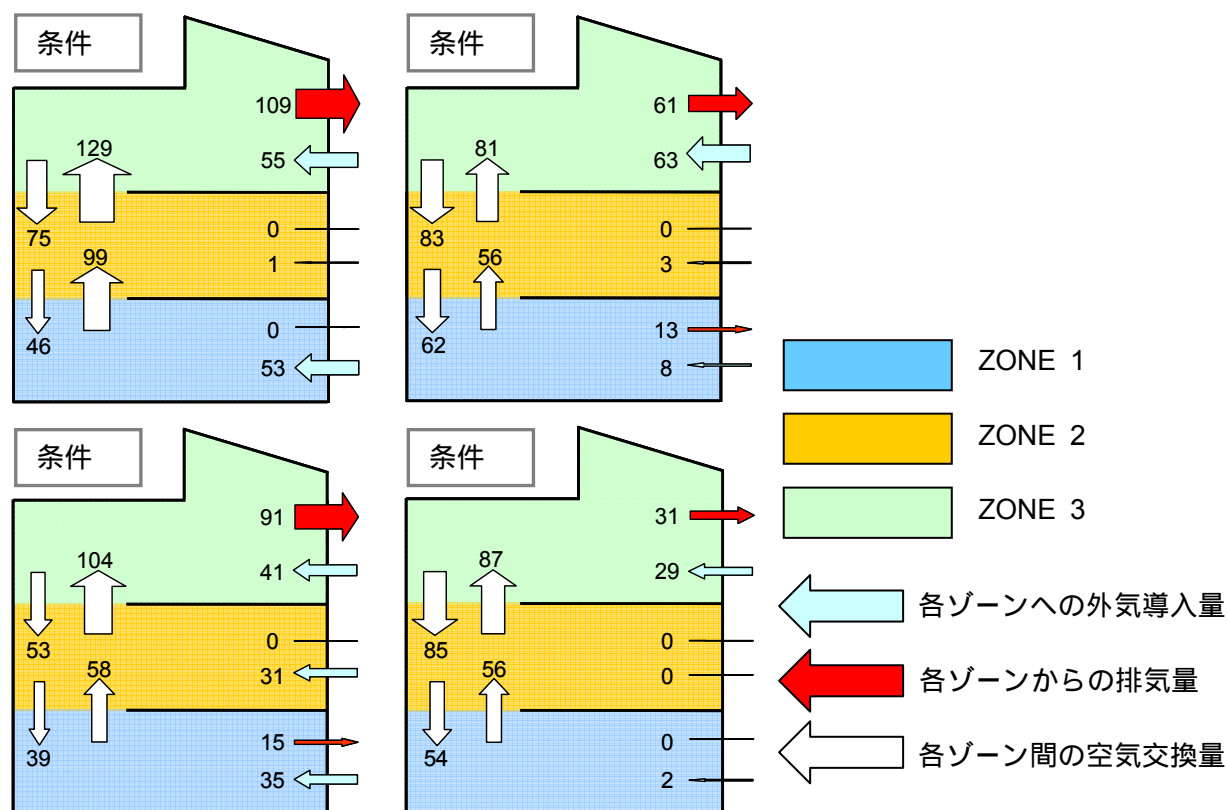


図 5-33 各条件における換気量算出結果 [m³/h]

各条件における外気導入量算出結果および PFT 法による外気導入量から算出した換気回数算出結果を表 5-79 に示す。

表 5-79 各換気条件における PFT 法による外気導入量および換気回数算出結果 (1 次実測)

	外気導入量 [m³/h]				換気回数 [回/h]			
	条件	条件	条件	条件	条件	条件	条件	条件
ZONE 1	53	8	35	2	0.65	0.09	0.43	0.03
ZONE 2	1	3	31	0	0.02	0.03	0.33	0.00
ZONE 3	55	63	41	29	0.54	0.62	0.40	0.29
全体	109	74	106	31	0.39	0.27	0.39	0.11

何れの条件においても PFT は各ゾーンに均一に拡散し、各ゾーンの各捕集点における PFT 気中濃度はほぼ同等であったため、PFT は室内空間で瞬時一様放散したと判断した。

1) 条件 (M 社製第 3 種換気条件)

ZONE 1、ZONE 3 で外気導入が行われ、ZONE 2 では殆ど行われていない結果となった。セントラル換気システムが 3 階に設置されていることで、ZONE 3 へ空気が流入し、ZONE 3 における排気量が大きくなった。ZONE 3 の外気導入量が大きくなったことも、換気システムの排気力に加えてペントハウスの温度が他よりも高かったことから、ZONE 3 内で温度差による換気が行われていた可能性が考えられる。

ZONE 1・ZONE 2 には排気ファンが設置されているにも関わらず、排気量がほぼ 0 に近く、3 階に設置されている換気システムの排気力が、住戸内の換気性状を支配していたと考えられる。

2) 条件 (M 社製第 3 種換気システム停止 - 1・2 階排気ファン稼働条件)

3 階のセントラル換気システムを停止したため、条件 ① と比べ ZONE 1 における外気導入量は少なくなった。ZONE 3 からの排気量は条件 ① と比べ大幅に減少した。また、ZONE 3 の排気を止めたため下階との空気交換量が増加したが、ZONE 1 から若干の排気が行われ、ZONE 2 においては外部へ排気されず、上階へと流れる傾向となった。

ZONE 1、ZONE 2 に設置されている排気ファンからは殆ど排気が行われず、上階へと流れる傾向となったが、これは 2 階のトイレで PFT ガスが十分に混合されないショートサーキットと、3 階への気流の流れによる 2 階での圧力減少が起きた可能性が考えられる。

3) 条件 (G 社製第 3 種換気条件)

条件 ②、③ と異なり、どのゾーンでも外気導入が行われ、排気は ZONE 3 で殆どが、ZONE 1 からは若干行われる結果となり、風量設計値と同様の傾向を示した。また、ZONE 3 への空気交換量、ZONE 3 における排気量が条件 ① と比べ減少した。条件③においても、ZONE 1 に設置されていた換気システムの排気性能は十分に発揮できず、殆どの排気が 3 階の換気システムによるものとなった。

4) 条件 (自然換気条件)

全ての排気ファンを止めたため、換気は外風及び室内外温度差や室内上下温度差により行われる。自然換気条件であるため、ZONE 3 における外気導入量、排気量は他の条件と比べ少なくなった。また、ZONE 1、ZONE 2 においては室内外での空気交換は行われていなかった。そのため、ZONE 3 に流入した空気は下階の ZONE 1、ZONE 2 を循環して、ZONE 3 から排気された。自然換気条件では住戸全体における換気回数が 0.11 回/h となり、機械換気設備無しでは十分な換気量を確保できないことが分かった。

1 次実測では、条件 ②、③ で換気量が設計値を下回る結果となったが、どの条件においても後述する CO₂ 法とほぼ同じ結果となっていた。また、換気システムを稼働した条件 ②、③ では、下階から外気が導入され、3 階 (ZONE 3) から排気される換気性状を示した。

(4) CO₂法を用いた換気量測定結果

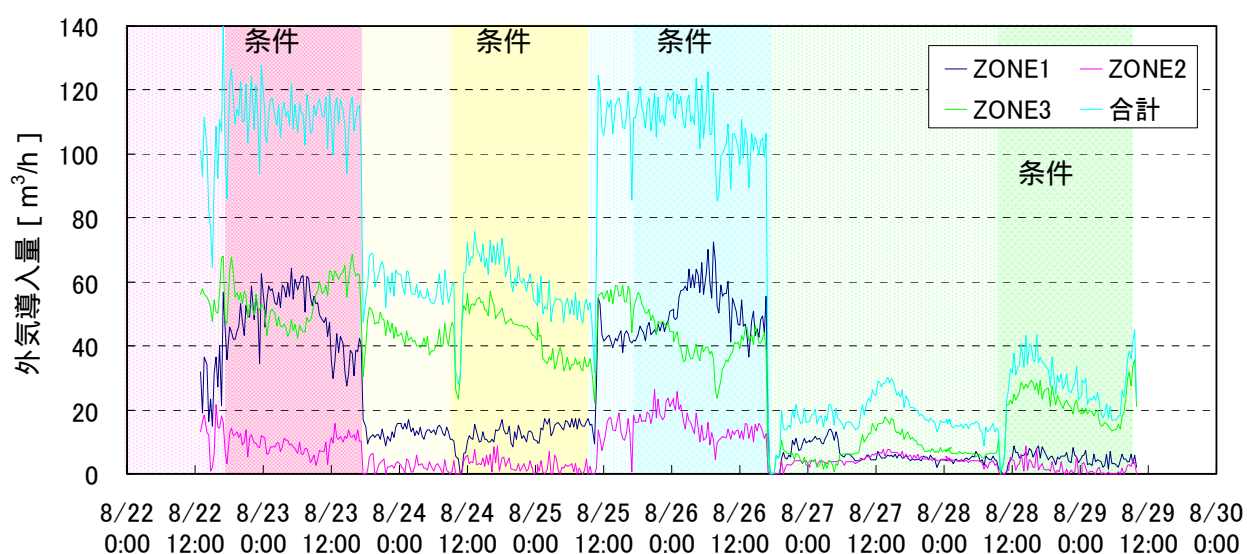
本実測では、住宅を3ゾーンに分け、表 5-67 に示す条件 ～ に対して換気量測定を行った。CO₂を用いて測定した各条件・各ゾーンにおける24時間平均濃度を表 5-80 に、平均外気導入量及び換気回数を表 5-81 に示す。また、各条件の各ゾーンにおける外気導入量経時変化を図 5-34 に示す。

表 5-80 CO₂法による24時間平均濃度 [ppm] (1次実測)

	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
外気	502	523	493	499
ZONE 1	2148	2076	2116	2051
ZONE 2	2002	2016	2006	2015
ZONE 3	2000	2003	2001	1998
合計	2050	2037	2041	2022

表 5-81 CO₂法による平均外気導入量及び換気回数 (1次実測)

	外気導入量 [m ³ /h]				換気回数 [回/h]			
	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
ZONE 1	49	13	52	5	0.70	0.19	0.74	0.07
ZONE 2	10	3	15	2	0.16	0.05	0.27	0.03
ZONE 3	54	44	42	22	0.53	0.43	0.41	0.22
合計	113	60	109	29	0.41	0.22	0.39	0.11

図 5-34 CO₂法による外気導入量の経時変化 (1次実測)

いずれの条件においても、各測定点での CO₂ 気中濃度はターゲット濃度 2000ppm でほぼ一定となっていた。

但し、気中濃度が設定値より高くなっている所があるが、これは換気条件の切り替えの際に実測者が住戸内で作業をしていたためである。また、条件 Ⅱ、Ⅲにおいて1階浴室の濃度が 2500ppm 前後になっていたが、浴室には排気設備が未設置であったため、浴室内の空気が淀んでいたと推測される。

セントラル換気システムを全て稼働した条件である条件①、③では、ZONE3 に設置されている換気システムの影響で ZONE3 での排気量が大きく、給気は ZONE3 及び他のゾーンから行われていた。また、条件 Ⅱでは ZONE1 の外気導入量が大きく ZONE 2 からは給気が殆ど無かったが、条件③では ZONE2 から給気が行われ、全ゾーンからバランスよく給気が行われていた。

換気システムの部分運転条件である条件②では、ZONE 3 での給気及び排気が住戸全体における換気量の多くの割合を占め、次に ZONE1 での外気導入の割合が高く、ZONE2 での外気導入量は少なかった。

また、換気量としては条件①、③の半分程度の換気量しか確保できず、セントラル換気システムを止めた状態では必要換気量を確保できないことが分かった。

自然換気条件である条件④では、換気は温度差や風などの外乱の影響を受け、ZONE1 と ZONE3 から流入し、ZONE3 から排気される結果となった。外気導入量としては住居全体において 0.11 回/h で、自然換気のみでは十分な換気量の確保ができないことが分かった。

5.6.5 2次実測結果

(1) 温湿度測定結果

2次実測における実測期間中の平均温湿度、最高温度、最低温度を表 5-82 に示す。

表 5-82 温湿度測定結果（2次実測）

測定条件			平均温度 [°C]	最高温度 [°C]	最低温度 [°C]	平均湿度 [%RH]
条件	ZONE 1	1F 風呂	22.5	23.8	21.8	81
		1F 洋室 1	22.2	23.7	21.3	82
		1F 廊下	22.7	24.3	22.0	76
		1F トイレ	22.7	23.9	21.9	77
	ZONE 2	2F 居間	22.1	23.1	21.6	79
		2F 廊下	22.1	23.1	21.4	79
		2F 台所	22.1	23.2	21.4	82
		2F トイレ	22.1	23.5	21.3	78
	ZONE 3	3F 風呂	22.2	23.7	21.3	78
		3F 廊下	22.6	24.3	21.7	75
		3F 洋室 2	22.3	24.0	21.4	76
		3F 洋室 3	22.0	23.4	21.1	77
		ペントハウス	22.5	24.8	21.4	76
	外気		21.2	25.2	19.2	88
条件	ZONE 1	1F 風呂	23.5	23.9	23.0	76
		1F 洋室 1	23.2	23.9	22.6	76
		1F 廊下	23.6	24.1	23.0	71
		1F トイレ	23.7	24.5	23.1	72
	ZONE 2	2F 居間	22.5	23.2	22.0	77
		2F 廊下	22.7	23.1	22.3	76
		2F 台所	22.7	23.3	22.3	79
		1F トイレ	22.9	23.5	22.3	74
	ZONE 3	3F 風呂	23.2	23.7	22.7	74
		3F 廊下	23.7	24.2	23.1	71
		3F 洋室 2	23.4	24.4	22.8	72
		3F 洋室 3	22.8	23.5	22.3	75
		ペントハウス	23.7	24.6	22.9	72
	外気		22.0	24.7	19.8	80

各測定点における温度変化は、外気温が19～25℃程度で変動が少なかったこと、エアコンを常時24℃設定としていたことで、どの測定ポイントにおいても21～25℃の間で変動する結果となった。

2次実測においては、ペントハウスの平均温度のみが他の測定点の平均温度を大幅に上回った。よって、前回の実測における各ゾーンの換気性状と、2次実測における換気性状に差が表れることが予想された。

外気温度は、各条件において室温を1～1.5℃下回る結果となった。また、どちらの条件においても変動範囲は5～6℃であり、室内の温度変動と同様の挙動を示したため、1次実測と比較して室内外の温度差は変動していなかった。

(2) 風向・風速測定結果

各条件の測定期間における風向・風速の測定結果、平均値としてはいずれの条件においても風速は1m/s以下であった。また、日中に風速が大きくなり、条件1においては南西よりの風向頻度が高く、条件2においては西よりの風向頻度が高かった。

(3) 風量測定結果

各排気口及び吸込みグリル、屋外の排気口にて測定を行った。測定時には室内のドアを開放し、M社製第3種換気条件及びG社製第3種換気条件で行った。

M社製第3種換気条件は10月2日(月)16:00~16:30に、G社製第3種換気条件は10月4日9:20~9:40に測定を行った。各測定点における風量測定結果及び設計風量を表5-83に示す。

表 5-83 風量測定結果(2次実測)

		測定場所	排気量 [m ³ /h]		設計排気量 [m ³ /h]	設計換気回数 [回/h]
			屋内	屋外		
M 社 製	ZONE 1	トイレ	31	32	38	0.48
	ZONE 2	トイレ	37	29	38	0.40
	ZONE 3	洋室 2	20			
		洋室 3	21			
		トイレ	20			
		階段	17			
		廊下	22			
		小計	100	92	100	0.99
	住戸全体		168	155	174	0.64
G 社 製	ZONE 1	納戸	9			
		トイレ	13			
		風呂	13			
		洗面所	11			
		小計	46	50	60	0.75
	ZONE 2	台所	14			
		トイレ	22			
		小計	36			
	ZONE 3	洋室 2	15			
		トイレ	21			
		洗面所	29			
		小計	65			
	ZONE 2, 3 合計		101	103	100	0.51
	住戸全体		147	153	160	0.58

M社製第3種セントラル換気システムにおいては、どのゾーンにおいても屋内よりも屋外の方が若干低い結果となった。しかし、いずれのゾーンにおいても屋内の測定値は設計値に近い値を示した。

G社製第3種セントラル換気システムにおいては、ZONE1での屋外の測定値が屋内より若干高かったが、設計排気量を下回る結果となった。1次実測と比べても低い値となった。ZONE2、ZONE3においては、屋内外共に測定値合計と設計値はほぼ同じ値を示した。

1次・2次実測共に、給気口からの導入風量は全ての給気口において $1\text{m}^3/\text{h}$ 以下の値となり、専用の給気口からの外気導入が殆ど行われていないことが分かった。給気口には汚れや目詰まりはなく、室内側に設置されているフィルターを外したところ導入風量が増加したため、フィルターの圧力損失が主な原因と推察される。

そのため、換気設備の性能は充分であっても計画された給気口からの外気導入ではなく隙間からの外気流入が主換気源となっていた。従って、給気口を設ける場合は機械換気設備だけではなく、給気口の設計や器具選定にも細心の注意を払う必要がある。

(4) PFT 法を用いた換気量測定結果

(a) 条件 (M 社製第3種換気条件)

測定期間は10月2日18:00～10月3日18:00である。測定時における各ゾーンのPFTの放散量及び放散速度を表5-84に、サンプラー捕集量及びPFT気中濃度を表5-85に示す。

表5-84 条件 におけるPFT放散量及び放散速度(2次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C ₆ F ₆	洋室1北	0.051	2.108
		洋室1東	0.050	2.087
		玄関	0.052	2.162
		1F廊下	0.050	2.100
		合計	0.203	8.458
ZONE 2	C ₇ F ₈	食堂	0.041	1.696
		居間 東	0.041	1.725
		居間 南	0.037	1.542
		台所 西	0.040	1.671
		合計	0.159	6.633
ZONE 3	C ₇ F ₁₄	洋室3北	0.020	0.825
		洋室3東	0.027	1.108
		階段	0.019	0.804
		洋室2西	0.023	0.963
		洋室2東	0.019	0.788
		ペントハウス	0.020	0.833
		合計	0.128	5.321

表 5-85 条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度 (2 次実測)

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE 1	風呂	5.85	0.37	0.05	97.5	5.8	1.0
	洋室 1	5.18	0.47	0.06	86.5	7.4	1.2
	廊下	6.08	0.42	0.04	101.3	6.7	0.8
	トイレ	4.36	0.38	0.03	72.7	6.1	0.6
	平均値	5.51	0.42	0.05	91.8	6.7	1.0
ZONE 2	居間	4.09	4.47	0.13	68.3	70.9	2.5
	廊下	4.09	4.80	0.08	68.2	76.2	1.5
	台所	3.49	3.62	0.10	58.2	57.4	1.9
	トイレ	2.73	2.86	0.07	45.7	45.4	1.4
	平均値	3.94	4.36	0.11	65.7	69.2	2.1
ZONE 3	風呂	3.37	3.23	1.28	56.3	51.3	25.0
	廊下	3.54	3.27	1.13	59.0	51.8	21.9
	洋室 2	4.07	3.84	1.12	67.9	60.9	21.8
	洋室 3	2.35	2.23	0.80	39.2	35.3	15.6
	ペントハウス	3.79	3.48	1.12	63.2	55.2	21.9
	平均値	3.43	3.22	1.12	57.3	51.1	21.8

(b) 条件 (G社製第3種換気条件)

測定期間は10月4日10:30～10月5日10:30である。測定時における各ゾーンのPFTの放散量及び放散速度を表5-86に、サンプラー捕集量及びPFT気中濃度を表5-87に示す。

表5-86 条件 におけるPFT放散量及び放散速度(2次実測)

	PFT	設置場所	放散量 [g]	放散速度 [mg/h]
ZONE 1	C ₆ F ₆	洋室 1 北	0.053	2.208
		洋室 1 東	0.054	2.238
		玄関	0.056	2.321
		1F 廊下	0.054	2.242
		合計	0.216	9.008
ZONE 2	C ₇ F ₈	食堂	0.039	1.646
		居間 東	0.041	1.700
		居間 南	0.034	1.404
		台所 西	0.040	1.675
		合計	0.154	6.425
ZONE 3	C ₇ F ₁₄	洋室 3 北	0.019	0.800
		洋室 3 東	0.027	1.137
		階段	0.021	0.858
		洋室 2 西	0.023	0.954
		洋室 2 東	0.019	0.775
		ペントハウス	0.019	0.808
		合計	0.128	5.333

表 5-87 条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度 (2 次実測)

		サンプラー捕集量 [μg]			PFT 気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}	C_6F_6	C_7F_8	C_7F_{14}
ZONE 1	風呂	7.01	0.90	0.03	116.4	14.2	0.5
	洋室 1	6.30	1.32	0.03	104.7	20.9	0.7
	廊下	6.37	1.12	0.03	105.8	17.6	0.6
	トイレ	4.48	0.96	0.02	74.3	15.2	0.5
	平均値	6.47	1.12	0.03	107.6	17.8	0.6
ZONE 2	居間	4.83	5.31	0.10	80.5	84.1	2.0
	廊下	4.51	5.18	0.09	75.2	82.0	1.7
	台所	3.91	4.18	0.15	65.2	66.2	3.0
	トイレ	2.80	3.07	0.08	46.6	48.5	1.6
	平均値	4.50	4.99	0.11	75.0	79.1	2.1
ZONE 3	風呂	3.65	3.39	2.08	60.8	53.6	40.3
	廊下	3.47	3.05	1.73	57.6	48.2	33.5
	洋室 2	3.91	3.49	1.74	65.0	55.1	33.7
	洋室 3	2.42	2.27	1.33	40.4	36.0	25.9
	ペントハウス	3.85	3.55	2.68	63.9	56.0	51.9
	平均値	3.48	3.15	1.87	57.8	49.8	36.3

(c) 各換気条件における換気量算出結果

条件 、 における PFT 換気量測定結果を図 5-35 に示す。また、各条件における外気導入量算出結果および PFT 法による外気導入量及び換気回数算出結果を表 5-88 に示す。

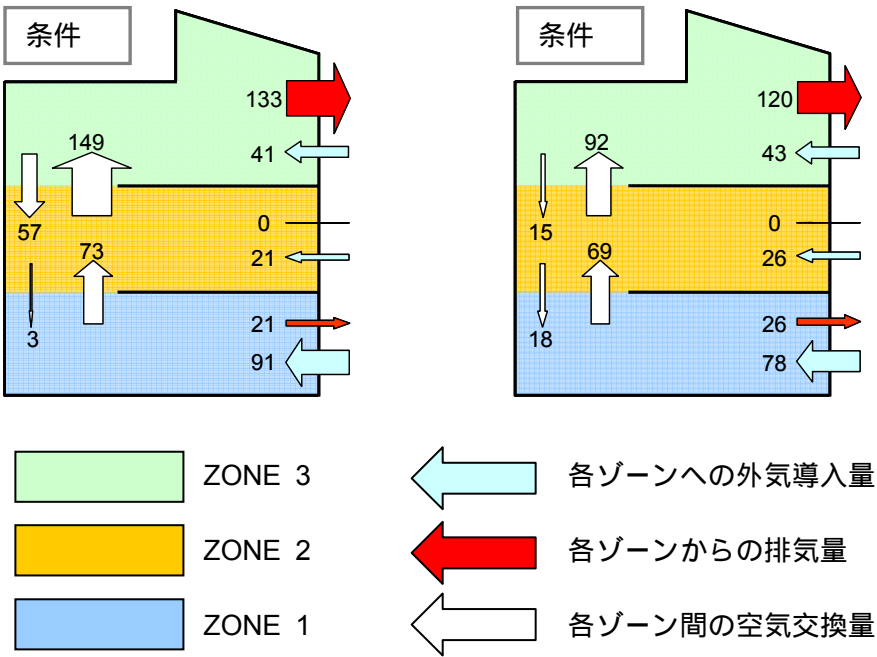


図 5-35 条件 、条件 における換気量算出結果 [m^3/h]

表 5-88 各条件における PFT 法による外気導入量
及び換気回数算出結果 (2 次実測)

	外気導入量 [m^3/h]		換気回数 [回/h]	
	条件	条件	条件	条件
ZONE 1	91	78	1.10	0.92
ZONE 2	21	26	0.30	0.28
ZONE 3	41	43	0.44	0.42
全体	153	147	0.58	0.53

2次実測ではPFT法と風量測定法の2種類の換気量測定法を用いた。各ゾーンの各測定点におけるPFT気中濃度はほぼ均一な値となり、PFTがゾーン内で均一に混合していた。

ZONE3の排気量は条件①で133 m³/h、条件③で120 m³/hとなり、どちらも設計排気量より高い値を示した。

1次実測と異なり、条件①、②ともにZONE2で放散したC₇F₈はZONE1で検出されず、ZONE3で放散したC₇F₁₄はZONE1、ZONE2では少量のみ検出された。2次実測では上階と下階との空気交換は少なく、下階から上階へ空気が流れる換気性状となっていた。

いずれの条件でも、外気導入量はZONE1が最も多く、次がZONE3であり、ZONE2が最も小さい値を示した。排気量はZONE3が大部分を占め、ZONE2からの排気は殆どない結果となった。1次実測と同様に第3種セントラル換気システムの特徴がよく現れたが、3階に設置されているセントラル換気装置の排気能力により住戸全体の圧力が左右されることが再度確認された。

また、住戸全体における外気導入量は2条件ともに設計値に近い値となり、第3種セントラル換気システムは住戸全体での換気性能は確保できるものの、圧力バランスが不均衡により外気導入量に偏りが生じる傾向が見られた。

5.6.6 1次実測及び2次実測の測定結果まとめ

1次実測及び2次実測の全結果を図5-36及び図5-37に、またPFT法とCO₂法の結果を表5-89に示す。

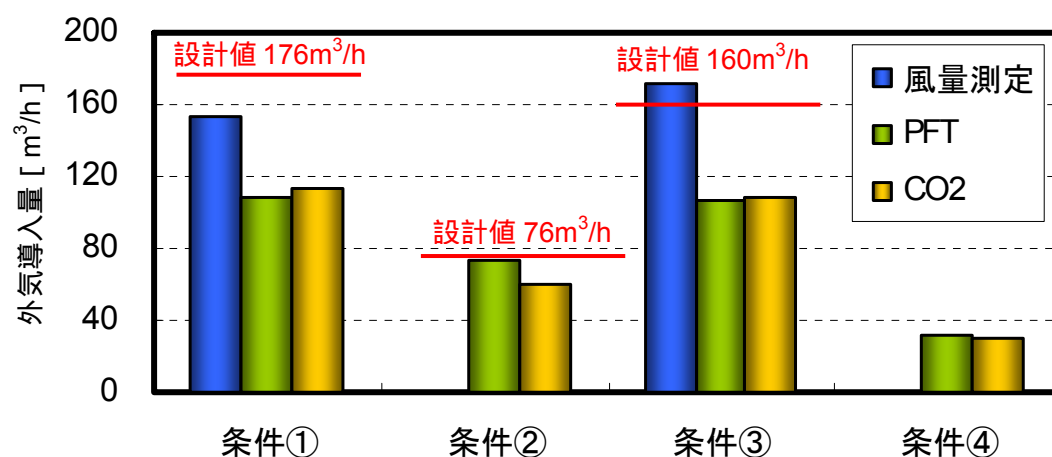


図 5-36 1次実測結果

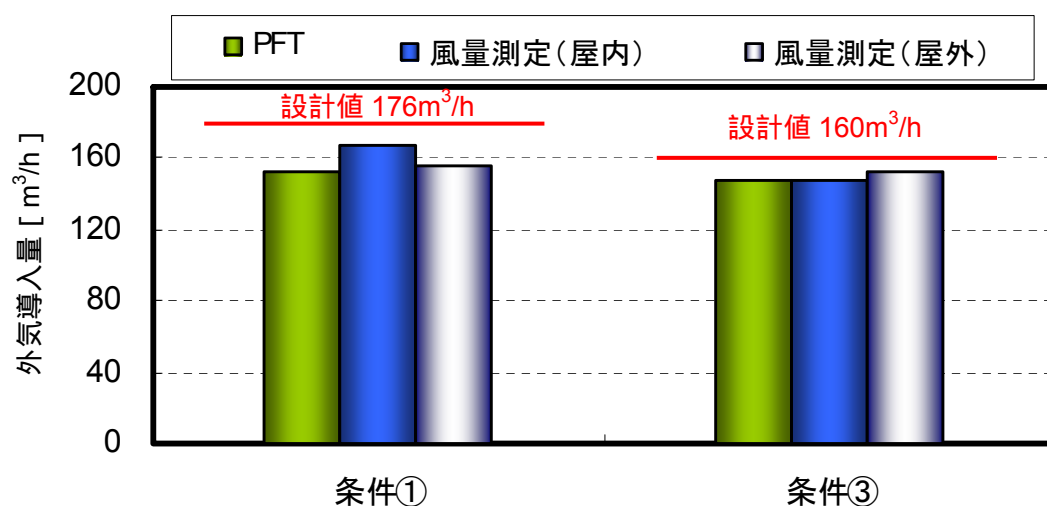


図 5-37 2次実測結果

表 5-89 1 次実測及び 2 次実測における PFT 法及び CO₂ 法換気量測定結果のまとめ

実測 条件	測定方法		1 次実測		2 次実測	
			外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]
条件	PFT 法	ZONE 1	53	0.65	91	1.10
		ZONE 2	1	0.02	21	0.30
		ZONE 3	55	0.54	41	0.44
		住戸全体	109	0.39	153	0.58
	CO ₂ 法	ZONE 1	49	0.70		
		ZONE 2	10	0.16		
		ZONE 3	54	0.53		
		住戸全体	113	0.41		
条件	PFT 法	ZONE 1	8	0.09		
		ZONE 2	3	0.03		
		ZONE 3	63	0.62		
		住戸全体	74	0.27		
	CO ₂ 法	ZONE 1	13	0.19		
		ZONE 2	3	0.05		
		ZONE 3	44	0.43		
		住戸全体	60	0.22		
条件	PFT 法	ZONE 1	35	0.43	78	0.92
		ZONE 2	31	0.33	26	0.28
		ZONE 3	41	0.40	43	0.42
		住戸全体	106	0.39	147	0.53
	CO ₂ 法	ZONE 1	52	0.71		
		ZONE 2	15	0.27		
		ZONE 3	42	0.41		
		住戸全体	109	0.39		
条件	PFT 法	ZONE 1	2	0.03		
		ZONE 2	0	0.00		
		ZONE 3	29	0.29		
		住戸全体	31	0.11		
	CO ₂ 法	ZONE 1	5	0.07		
		ZONE 2	2	0.03		
		ZONE 3	22	0.22		
		住戸全体	29	0.11		

2種類の第3種セントラル換気システムが設けられている3階建の戸建住宅において、各階を1つのゾーンとして垂直に3つのゾーンに分け、風量測定法・PFT一定発生法・CO₂一定濃度法（1次実測のみ）を用いた換気量測定を行った。1次実測と2次実測から得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 風量測定結果において、測定風量が設計換気風量より若干少なかったが、その差は小さく実測対象住宅に設置されている換気システムは設計値に等しい性能を持っていることが確認できた。

第3種セントラル換気システムは、1次・2次実測共に換気回数0.5～0.6回/hの排気性能を持っており換気設備としては0.5回/h常時換気基準を満たしていた。屋内と屋外での風量測定結果に大きな差は見られなかった。しかし、給気口の圧力損失により、給気口からの外気導入が殆ど行われていないことが分かった。

- 2) PFT法を用いた換気量測定に置いて、1次実測では設計値より低い結果となった。2次実測では、条件①、②ともに設計値に近い換気量測定結果となった。

1次、2次実測ともに換気システムを稼働した条件①、②では、ZONE 1及びZONE 3から外気が導入され、ZONE 3から排気される換気性状を示した。

1次測定の条件③、④では下階では外気導入は殆ど行われず、ZONE 3で外気が流入し、ZONE 1、ZONE 2を循環してZONE 3で排気された。条件①、②と条件③、④では、各ゾーンにおける換気性状が異なる傾向を示した。

- 3) 1次実測のCO₂一定濃度法による換気量測定において、条件①及び条件③の換気システム稼働条件で換気回数は約0.4回/hであり、条件②は0.2回/h、そして条件④の自然換気条件では約0.1回/hであった。

- 4) 1次実測では、PFT法とCO₂一定濃度法が近い値を示したが、風量測定法の値が大きかった。原因として、風量測定を事前に行ったこと、またショートサーキットが生じていたことが考えられた。風量測定を実測期間中に行った2次実測では、PFT法と風量測定が近い値を示した。

- 5) 換気条件による比較では、換気システム稼働条件である条件①、条件③において、1次実測では上下階間で空気交換が行われていたが、2次実測では上下階間の空気交換は殆ど行われずに、1階で給気が行われ、3階から排気される結果となった。1次実測では、室内上下温度差による対流が生じていたが、2次実測は上下温度差が殆どなかったため、3階のダクトセントラル本体が住戸の換気性状を支配していたと考えられる。

条件①、②において、1次実測では風量測定法が他の測定法より大きい値を示しており、2次実測では風量測定、PFT法共に設計値に近い値であった。

- 6) 1次実測と2次実測の大きな違いは、2次実測において1階からの外気導入量が大幅に増えていることである。また、1次実測では少なかった2階での外気導入も2次実測では増加していることが確認された。1次実測に比べ外気温が低く、屋内外の温度差による換気が増えたことも1つの要因として考えられるが、1次実測では住宅性能試験場周辺で撤去工事が行われており、撤去現場周辺に防塵シートが設置されていたが、2次実測期間中には撤去が完了して空き地になっていた。そのため、周辺の風環境が変わったのが主な要因として考えられる。

5.7 全実測における PFT 法換気量測定結果と他の換気量測定結果の比較

これまで行ってきた実住宅における換気量測定の結果を表 5-90 にまとめる。また、表 5-90 にて陰影で記した部分を比較したグラフを図 5-38 に示す。

表 5-90 全実測における各換気量測定法による測定結果のまとめ

実測対象	実測条件		換気量測定結果 換気回数 [回/h]			
			PFT 法	SF ₆ 法	CO ₂ 法	風量測定
2 階建 戸建住宅	条件Ⅰ		0.54	-	0.63	0.66
	条件Ⅱ	C ₆ F ₆ -C ₇ F ₈ 組み合わせ	0.70	-	-	-
		C ₆ F ₆ -C ₇ F ₁₄ 組み合わせ	0.76	-	-	-
同一分譲地 区内の新築 戸建住宅	住宅 A	第 1 種換気	0.40	0.62	0.46	0.73
		自然換気	0.17	-	0.14	-
	住宅 B	第 1 種換気	0.33	-	-	-
工業地域の 集合住宅	1 次実測	ハイブリッド換気	0.45	-	-	-
		常時第 3 種換気	0.68	-	-	-
		自然換気	0.24	-	-	-
	2 次実測	ハイブリッド換気	0.20	0.10	0.18	-
		常時第 3 種換気	0.28	0.23	0.24	-
		自然換気	0.15	0.11	0.12	-
3 階建 戸建住宅	1 次実測	M 社製第 3 種換気	0.39	-	0.41	0.56
		M 社製第 3 種換気停止 - 1、2 階の排気ファンのみ稼働	0.27	-	0.22	-
		G 社製第 3 種換気	0.39	-	0.39	0.62
		自然換気	0.11	-	0.11	-
	2 次実測	M 社製第 3 種換気	0.58	-	-	0.64
		G 社製第 3 種換気	0.53	-	-	0.58

陰影部分は PFT 法と他の換気量測定法との比較測定

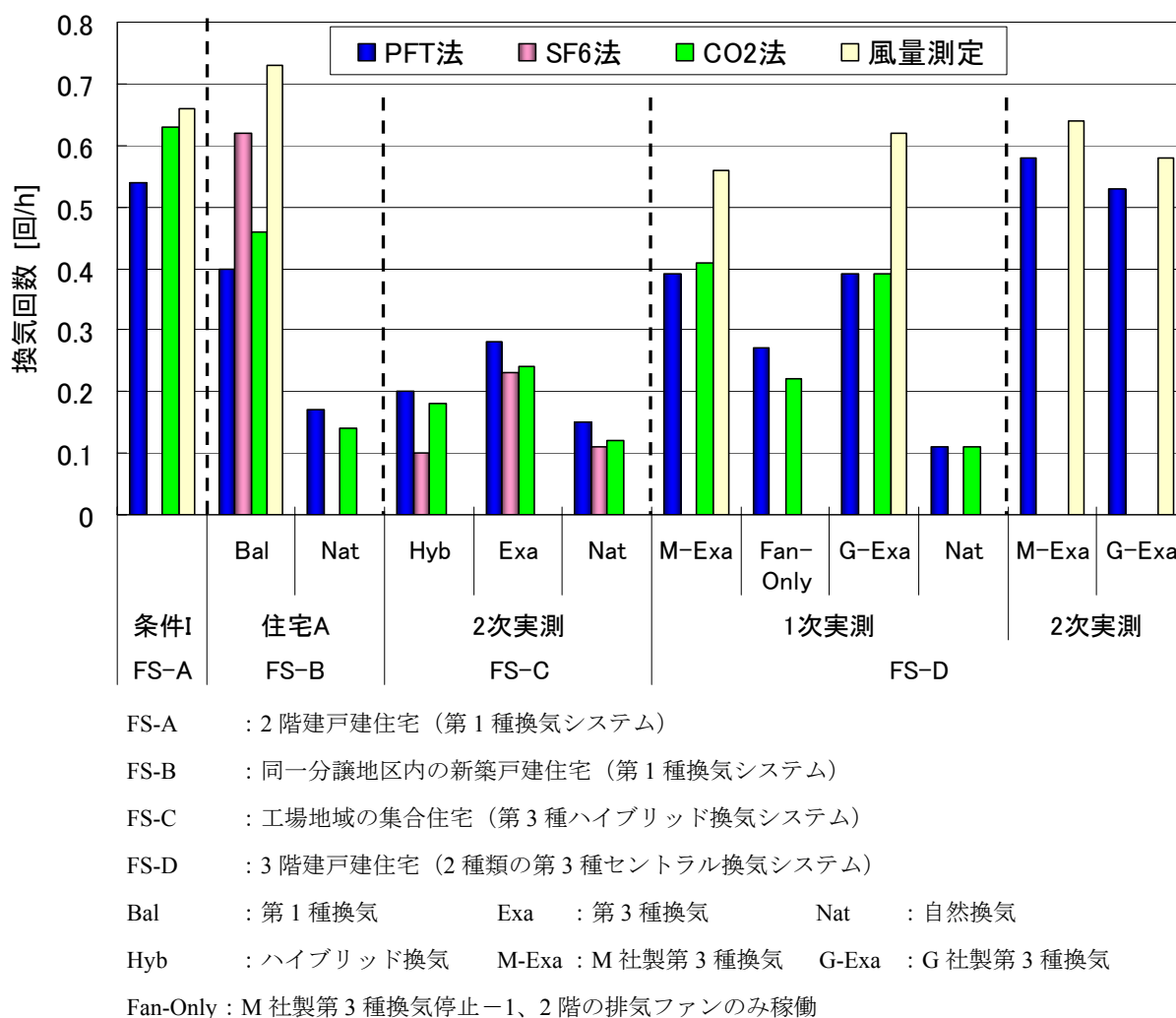


図 5-38 全実測における PFT 法結果と他の換気量測定法結果の比較

PFT 法が SF₆ 法より低い結果を示したのは「同一分譲地区内の新築戸建住宅」の第 1 種換気条件であり、「工場地域の集合住宅」における 2 次実測結果では PFT 法の結果が若干高かったがその差は大きく無かった。PFT 法と CO₂ 法を比較すると全体的に同等な結果が得られている。

風量測定法は PFT 法、SF₆ 法、CO₂ 法のトレーサガス法より換気量を大きく評価していることが分かった。これは、住宅における換気は給気・排気口のみから行われるものではなく、住宅の窓・ドアなどの開口部及び開口部の隙間からも行われるため、換気口のための測定となる風量測定法では住戸全体の換気量を正しく評価できないからである。

これまでの結果から、パッシブ手法を用いる PFT 法はアクティブ手法の換気量測定法より簡便でありながらも同等な精度で換気量測定法ができることが検証できた。

PFT 法の現場測定における実用性及び有効性が確認された。

5.8 まとめ

本章では PFT 法を用いた換気量測定法の開発及び改良研究として実住宅への適用性と実用性を検証することと、実住宅における換気性能を把握することを目的として換気量実測を行った。

2 階建戸建住宅（第 1 種換気システム）、同一分譲地内の新築戸建住宅 2 戸（第 1 種換気システム）、工業地域の集合住宅（第 3 種ハイブリッド換気システム）、3 階建戸建住宅（2 種類の第 3 種セントラル換気システム）において、各換気システムの稼働条件、自然換気との組み合わせ等、換気条件を変化させ、PFT 法による換気量測定を $\text{SF}_6 \cdot \text{CO}_2$ トレーサーガス法、風量測定法による測定と同時に行い、比較検討した。

本研究で得た知見を以下にまとめる。

- 1) 第 1 種換気システムを備えた新築戸建住宅の換気量実測では、同時期に測定を行った CO_2 法Ⅱ、 SF_6 法、PFT 法Ⅰにおける換気回数はそれぞれ 0.63、0.45、0.54 回/h と測定法による結果の差は大きくなく PFT 法は SF_6 法、 CO_2 法と同等な結果が得られた。

排気口からの風量測定では、給気口からの風量測定結果より 2 倍近く大きな風量を示した。排気口付近の開口部からの空気流入をそのまま排気するショートサーキットも含めた結果と考えられたが、実際は排気風量から算出した換気回数より低い値となると考えられる。

PFT 物質の組み合わせが PFT 換気量測定結果に与える影響を調べるための C_6F_6 – C_7F_8 、 C_6F_6 – C_7F_{14} の組み合わせによる測定では、住戸全体でそれぞれ 0.70 回/h、0.76 回/h と同等な結果となった。しかし、ゾーン間の空気交換量と空気流動には違いが見られた。

今後はサンプリングレートの気中濃度による依存性を少なくするため、室の有効混合容積と換気量予想値から各 PFT の予想濃度範囲を設定し気中濃度を予め予測して、サンプリングレート試験から精度が確保できる気中濃度範囲に入るよう PFT ドージング量を調整する必要性が示された。

- 2) 同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸における測定で、住戸 A は住戸全体を 3 ゾーンに分け、第 1 種換気、自然換気の 2 条件とし、PFT 法、 SF_6 法、 CO_2 法、風量測定法を、住戸 B は 2 ゾーンにし第 1 種換気条件において、PFT 法、風量測定法を用いて測定を行った。

住戸 A の第 1 種換気条件において、 SF_6 法では換気回数 0.62 回/h、 CO_2 法で 0.46 回/h、PFT 法は 0.40 回/h となった。PFT 法は、 CO_2 法の結果に近い値となった。自然換気条件において、PFT 法の外気導入量は、 CO_2 法よりやや大きい値を示したが、大きな差はなかった。風量測定法は給気による換気回数が 0.73 回/h となり 3 種のトレーサーガス法に比べ大きな換気量となる傾向を見せた。

PFT 換気量測定による外気導入量及び室間の空気交換量において、第 1 種換気・自然換気条件共に上下階（ZONE 1–ZONE 2 間）での交換は見られたが、ZONE 2–ZONE 3 間での空気の

交換が殆ど見られず、ZONE 3 には外気からの空気導入も殆ど行われていない気密状態となっていた。風量測定法、SF₆法、CO₂法ではこのような現象は見られなかったため、これは C₇F₁₄ のサンプリング若しくは分析時に問題が生じたことが原因と考えられた。

住戸 B の第 1 種換気条件において、住戸全体の換気回数は 0.33 回/h となった。ゾーン毎の結果は、ZONE 1 では 0.46 回/h、ZONE 2 では 0.20 回/h となり、空気交換は ZONE 2 から ZONE 1 へ行われていたが ZONE 2 では外気導入量が不足していた。

- 3) 第 3 種ハイブリッド換気システムが設置された工業地域の集合住宅における多数室換気実測では、住戸を 3 つのゾーンに分け、ZONE1 には C₆F₆、ZONE2 に C₇F₈、ZONE3 に C₇F₁₄ を設置して測定を行った。1 次実測を行った 1 年後に 2 次実測を行った。換気量測定法としては 1 次実測では PFT 法のみを、2 次実測では PFT 法、SF₆法、CO₂法を用いた。

1 次実測の結果、各条件における換気回数は、常時第 3 種換気 0.68 回/h、ハイブリッド換気 0.45 回/h、自然換気 0.24 回/h となり、ハイブリッド換気システムで必要換気量に近い換気量が確保できることが分かった。いずれの換気条件でも、ZONE3 > ZONE2 > ZONE1 の順に外気導入量による換気回数が減少する傾向を示した。

また、いずれの条件においても ZONE2 からの排気量は少なく、外気から導入された空気は ZONE3 へ流れる換気性状となった。ZONE3 では過換気、ZONE1 では換気不足となり、住戸全体で見るとバランスのよくない換気性状となっていた。また、ZONE1 には他のゾーンから空気が流れ込むため、古い空気齢の空気が入ってくる空気環境となっていた。

2 次実測の結果、住戸全体の換気回数は常時第 3 種換気 0.28 回/h、ハイブリッド換気 0.20 回/h、自然換気 0.15 回/h となり、常時第 3 種換気条件及びハイブリッド換気条件共に必要換気回数 0.5 回/h を満たしていなかった。1 次実測結果に比べ、全条件において換気量が大幅に減少していて、その原因として給排気口及び排気ファンのメンテナンス不足による換気性能低下が考えられた。

換気量測定法による比較として、ハイブリッド換気条件では PFT 法 0.20 回/h、CO₂法 0.18 回/h に比べ SF₆法が 0.10 回/h と少ない結果となった。しかし、常時第 3 種換気及び自然換気条件では PFT 法、CO₂法、SF₆法の 3 測定法が同等な測定結果を示した。PFT 法は CO₂法、SF₆法と同等な測定精度が得られた。

- 4) 3 階建戸建住宅における換気量測定では縦方向のゾーン分けにおける PFT 法の測定精度及び実用可能性について検討した。更に、測定対象住宅には 2 種類の第 3 種セントラル方式の換気システムが設置されており、3 階建住戸の換気性状の把握を行った。測定法としては PFT 法、CO₂一定発生法（1 次実測のみ）、風量測定法の 3 つの換気量測定法を用いた。夏季に 1 次実測を、秋季に 2 次実測を行った。

PFT 法を用いた換気量測定において、1 次・2 次実測ともに換気システムを稼動した条件、では、ZONE 1 から外気が導入され、ZONE 3 から排気される換気性状を示した。1 次測定の

条件①、②では下階では外気導入は行われず、ZONE 3 で外気が流入し、ZONE 1、ZONE 2 を循環して ZONE 3 で排気された。

1 次実測の CO₂ 一定濃度法を用いた換気量測定において、換気システム稼働条件で換気回数は約 0.4 回/h であり、自然換気では約 0.1 回/h であった。

1 次実測では、PFT 法と CO₂ 一定濃度法が近い値を示したが、風量測定法の結果が大きくなった。2 次実測では、PFT 法と風量測定が近い値を示した。

各測定法の比較として、換気システム稼働条件である条件①、③において、1 次実測では上下階間で空気交換が行われていたが、2 次実測では上下階間の空気交換は殆ど行われず、1 階で給気が行われ、3 階から排気される結果となった。1 次実測では、室内上下温度差による対流が生じていたが、2 次実測は上下温度差が殆どなかったため、3 階のダクトセントラル本体が住戸の換気性状を支配していたと考えられる。

条件①、③において、1 次実測では風量測定法が他の測定法より大きな値を示したが、2 次実測では風量測定、PFT 法共に設計値に近い値であった。

1 次実測と 2 次実測の最も目立つ違いは、2 次実測において 1 階からの外気導入量が大幅に増えていることである。また、1 次実測では少なかった 2 階での外気導入も 2 次実測では増加していることが確認された。

本研究で行われた実測の結果から、PFT 法が SF₆ 法より低い結果を示したのは「同一分譲地区内の新築戸建住宅」の第 1 種換気条件であり、「工場地域の集合住宅」における 2 次実測結果では全ての条件で PFT 法の結果が SF₆ 法の結果より若干高かったがその差は大きくなかった。

PFT 法と CO₂ 法を比較すると全体的に同等な結果が得られた。

風量測定法は PFT 法、SF₆ 法、CO₂ 法のトレーサーガス法より換気量を大きく評価していることが分かった。

以上の結果から、パッシブ手法を用いる PFT 法はアクティブ手法の換気量測定法より簡便でありながらも同等な精度を確保できる換気量測定法であることが検証できた。PFT 法の現場測定における実用性及び有効性が確認された。

【参考文献】

- 1) 空気調和・衛生工学会：トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工学会規格、2004
- 2) W.J. Fisk, D. Faulkner, and A.T. Hodgson: The pollutant control index: a new method of characterizing ventilation in commercial buildings, Proceedings of Indoor Air '93, Vol.5, pp.9-14, 1993
- 3) Hans Stymne and Anita Eliasson: Development of a new PFT-method for ventilation rate measurements, NBS-I, The Development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.37-48, 1991
- 4) Jorma O. Säteri: The measurement of ventilation using integrating tracer techniques, NBS-I, The development of the PFT-method in the Nordic Countries, pp.11-32, 1991
- 5) J. Sateri, A. Majanen: The evaluation of field measurements of ventilation parameters made using the passive perfluorocarbon method, Clima 2000, Vol.1, pp.282-289, 2000
- 6) Russell N. Dietz and Edgar A. Cote: Air infiltration measurement in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, Environment International, Vol. 8, pp. 419-433, 1982
- 7) Russell N. Dietz, Robert W. Goodrich, Edgar A. Cote, Robert F. Wieser, "Detailed Description and Performance of a Passive Perfluorocarbon Tracer System for Building Ventilation and Air Exchange Measurements", ASTM STP 904, pp. 203-264, 1986
- 8) PentIAQ: Description and accuracy of the PFT-homogeneous emission technique. The method of Pentiaq, 1998
- 9) 柏原誠一、吉田和之、田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その18 CO₂一定濃度法を用いた戸建て住宅実測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2005
- 10) 田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、吉田和之、柏原誠一、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その19 PFT法を用いた換気量簡易測定法検討実測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2005
- 11) 服部将志、田中祐輔、窪田圭佑、金勲、田辺新一、柏原誠一、吉田和之：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その23 戸建住宅におけるPFT法、CO₂一定濃度法、SF₆一定濃度法、風量測定法を用いた換気量測定の比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.921-922、2006
- 12) 柏原誠一、松田克己、吉田和之、今井秀秋、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その24 戸建住宅実測におけるPFT法の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.923-924、2006
- 13) 服部将志、柏原誠一、吉田和之、田中祐輔、金勲、窪田圭佑、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その15 戸建住宅における換気量簡易測定法の性能検証実測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2006
- 14) 東田浩毅、青木泰輔、谷英明、西村栄利子、窪田圭佑、金勲、田渕誠一、田辺新一、村江行

- 忠、浅井靖史：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その16 集合住宅における3種の換気条件における換気量実測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2005
- 15) 空気調和・衛生工学会：室内換気効率の現場測定法・同解説、空気調和・衛生工学会規格、2002
- 16) Peter W. Grieve : Measuring ventilation using tracer-gas, Brüel & Kjær, 1989
- 17) Hattori M, Tanaka Y, Hoon K, Kashiwara S, Yoshida K, Tanabe S : Survey of ventilation rate by passive PFT, CO₂ constant concentration and airflow measurement method in three-storied detached house, Proceedings of Roomvent 2007, 2007
- 18) Keigo Mochida, Masayuki Hattori, Yusuke Tanaka, Seiichi Kashiwara, Kazuyuki Yoshida, Masaki Tajima, Hoon Kim, Shin-ichi Tanabe : Ventilation measurement using PFT method, Proceedings of Indoor Air 2008, 2008
- 19) 金勲、持田恵吾、田中祐輔、服部将志、柏原誠一、松田 克己、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その27 風量測定法を用いた3階建の戸建住宅における換気量測定、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2007
- 20) 服部将志、田中祐輔、持田恵吾、金勲、今井秀秋、吉田和之：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その28 PFT法を用いた3階建の戸建住宅における換気量測定、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2007
- 21) 持田恵吾、田中祐輔、服部将志、金勲、柏原誠一、吉田和之、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その29 CO₂一定濃度法を用いた3階建の戸建住宅における換気量測定、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2007
- 22) 持田恵吾、柏原誠一、吉田和之、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その17 PFT一定発生法、CO₂一定濃度法、風量測定法を用いた3階建の戸建住宅における換気量測定、空気調和衛生工学会大会学術講演解説論文論文集、2007
- 23) 柴田化学株式会社, パッシブガスチューブ使用マニュアル
- 24) ISO : Indoor, ambient and workplace air. Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography. Diffusive sampling, ISO 10617-2, 2003
- 25) 佛願道男、井上嘉則、青山哲也、細川利昭、関根嘉香：VOCs用高感度パッシブ型捕集管、日立化成テクニカルレポートNO.41、2003
- 26) 森田昌敏他：有害大気汚染物質測定の実際、社団法人日本環境衛生センター、1997
- 27) 田中祐輔、窪田圭佑、服部将志、金勲、田辺新一、田島昌樹、佐藤健一、村江行忠：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その25 実大実験集合住宅におけるPFT法、SF₆一定発生法、CO₂一定濃度法による換気量測定比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2006
- 28) 金勲、窪田圭佑、田中祐輔、服部将志、田辺新一、田島昌樹、佐藤健一、村江行忠：パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その26 実大実験集合住宅における差圧測定から算定した換気量とPFT法の比較、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、2006
- 29) 金勲、田島昌樹、佐藤健一、村江行忠、田中祐輔、田辺新一：パッシブ測定法を用いた室内

空気質評価 その 16 実大実験住宅における換気量測定法の比較検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2006

- 30) Tanaka Y, Sato K, Tajima M, Tanabe S, Murae Y, Kim H, Hattori M : Comparison of PFT method with constant-injection, constant-concentration and theoretical calculation methods for ventilation measurement, Proceedings of Roomvent 2007, 2007

第6章

パッシブ法を用いた 韓国新築集合住宅における空気質実態調査

第6章 パッシブ法を用いた韓国新築集合住宅における空気質実態調査

6.1 背景と目的

韓国では、2003年5月に既往の「地下生活空間空気質管理法」を改正し、「多衆利用施設等の室内空気質管理法」が制定・公布され、2004年5月から施行された。この法により、一定規模以上（2005年12月現在100世帯以上）の新築集合住宅において、入居前に室内空気質の測定及び入居者への告示が義務化された¹⁾。

シックハウス問題に対処するため韓国政府は2004年と2005年に新築集合住宅に対する3回の大規模な実態調査を行った。2004年2月～4月にかけて基礎実態調査を行い、2004年6月～2005年3月と2005年5月～同年8月に1次（266世帯）、2次（有効数733世帯）実態調査を行った。

表 6-1 韓国政府による1次、2次実態調査結果と室内気中濃度基準値 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

物質名	1次実測		2次実測		暫定 勧告基準	勧告 基準値	日本 指針値
	平均値	最高値	平均値	最高値			
ホルムアルデヒド	266	1960	293	1497	100 - 350	210	100
アセトアルデヒド	-	-	49	595	-	-	48
ベンゼン	4	20	5	92	5 - 45	30	-
トルエン	850	4440	1003	5014	850 - 1300	1000	260
エチルベンゼン	180	2810	120	1192	360 - 1500	360	3800
キシレン	120	950	287	2723	240 - 700	700	870
スチレン	150	1920	63	531	300 - 1500	300	220

これらの実態調査は新築集合住宅における室内空気質の実態把握と気中濃度指針値を定めるための基礎調査であり、その結果と公聴会での各界の意見を収斂し暫定勧告基準が提案された²⁾。2005年12月には6物質に対する気中濃度勧告基準値が公布され、2006年1月から施行された³⁾。

表 6-1 にその実態調査結果と勧告基準値を纏めたものを示す。但し、気中濃度測定時に換気設備を停止して測定する方法となっているため日本の厚生労働省の指針値と直接の比較は難しい。また、必要換気量 0.7 回/h の確保が義務化され、2006年3月から施行された。建材からの化学物質放散量測定に関して ISO を基に KS-ISO シリーズが制定されている。

この実態調査は気中濃度に限られ、実住宅における建材からの放散特性や換気状況の把握は殆ど行われていない。室内化学汚染を防ぐためには放散源対策と換気が有効である。具体的な対策のためには気中濃度だけではなくこれらの要素を同時に考慮する必要がある。更に、韓国の住宅には日本や欧米とは異なった特徴がある。

- 1) アパート（日本でのマンションに該当するが大規模の団地型で高層のことが多い）が多く、2000年度の統計報告では全体住宅の47.7%をこのような大規模なアパートが、小規模の集合住宅が15.2%、その他戸建住宅等が37.1%を占めている⁴⁾
- 2) RC・SRC造が大多数であり、2重窓を採用しているため気密性が高い
- 3) 温水式床暖房（オンドル）を用いているため、暖房期間中は床面が高温になること等が挙げられる。

そこで、本研究ではこれまで開発してきたパッシブ法を用い、韓国新築集合住宅における気中濃度、フラックス発生量、換気量に関して室内空気質の実態調査を行うことを目的とし実測を行った。

本章では、実験集合住宅2戸と新築集合住宅5戸、合計7戸、10部屋における室内気中濃度、各面からのフラックス発生量、換気量及び温湿度の測定結果を纏める。

6.2 実測概要

表 6-2 に実測対象住宅の概要を、図 6-1 に測定対象住宅の平面及び各測定点を示す。実測対象住宅は韓国ソウル市とソウル近郊に建つ 7 戸（総 10 室）であり、2004 年 1 月（冬季）に住宅 A、B、C、同年 6 月（中間期）に D、E、F、G において測定を行った。住宅 A、B は住宅性能テストを目的として建てられた実験集合住宅であり、A にはホルムアルデヒドと VOCs 対策が施されている。B にはホルムアルデヒド対策のみ施されている。他の 5 戸は新築実住宅であり、新空気質管理法が適用される前の集合住宅であるためシックハウスのための建材対策は施されていない。

測定は外部と直接面しているベランダの窓とドアを全て開放し、ベランダ内側と室内の間の開口部のみを閉めた状態で行った。但し、実験当時の韓国集合住宅は窓開け換気（自然換気）と厨房フード、浴室排気（第 3 種換気）を用いた機械換気が出来るが常時換気設備は設置されていなかった。測定期間中排気ファンは全て停止し、冬季の床暖房以外に空調は行われなかった。各住宅に使用された仕上げ材の一覧を表 6-3 に示す。

表 6-2 実測対象住宅の概要

住宅	高さ [階]	床面積 [m ²]	測定時点	実測期間 (2004 年)	備考
A	1	54.1	内装工事完了直後	01/13 - 01/15	住宅性能実験集合住宅
B	2	54.1	内装工事完了直後	01/13 - 01/15	住宅性能実験集合住宅
C	10	129.5	入居前	01/13 - 01/15	新築集合住宅
D	9	54.7	内装工事完了直後	06/07 - 06/09	新築オフィステル ¹⁾
E	9	54.7	内装工事完了直後	06/07 - 06/09	新築オフィステル
F	16	110.3	入居開始	06/07 - 06/09	新築集合住宅
G	14	155.5	入居開始	06/08 - 06/10	新築集合住宅

- 1) ここで、オフィステル (Officetel) とはオフィス (Office) とホテル (Hotel) を組み合わせた造語であり韓国では 80 年代初に登場した。最初は業務が中心で簡単な寝食が行われる空間であったが 90 年代中盤オフィステルの住居比率に関する建築基準が緩和されたことを切っ掛けにマンションの代替商品として小規模の住居用オフィステルが市場を先導するようになった。建築法上は業務施設であるが住居機能に各種サービス施設等が整った高級住宅の概念に変貌した。

- Diffusion Sampler (VOCs/Carbonyls)
- Diffusion Sampler (PFT Sampling)
- Tracer gas (C_6F_6)
- Tracer gas (C_7F_8)
- △ 床用小型セル
- △ 壁用小型セル
- ▲ 天井用小型セル

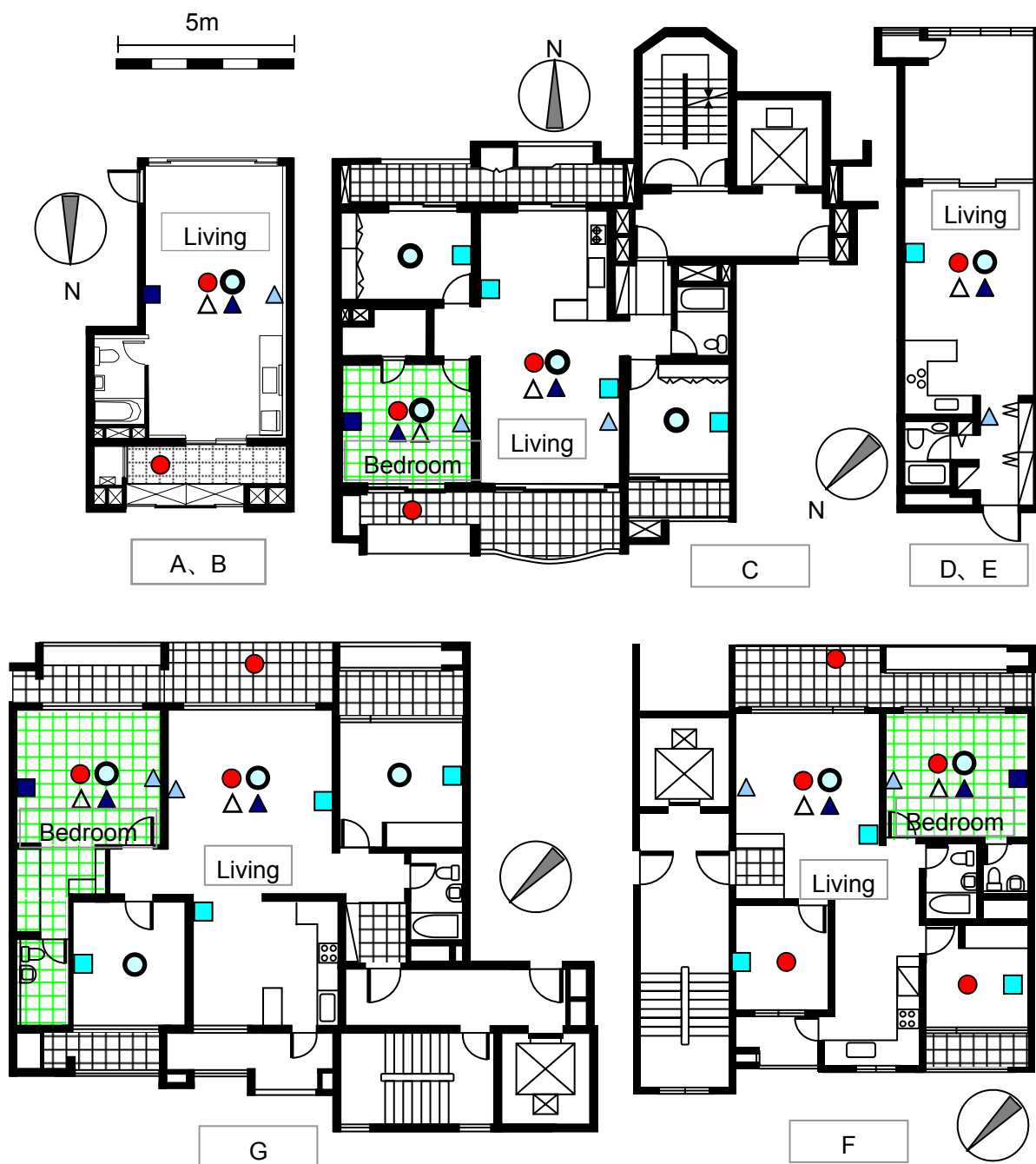


図 6-1 測定対象住宅の平面及び各測定点

表 6-3 内装仕上げ材

住 宅		床	壁
A		溶剤型エポキシ系オンドルフローリング接着剤 合板オンドルフローリング	石膏ボード 壁紙用糊
B		ウレタン系オンドルフローリング接着剤 合板オンドルフローリング	下地用活性炭紙 PVC シルク壁紙
C	居間	溶剤型エポキシ系オンドルフローリング接着剤 合板オンドルフローリング	石膏ボード 澱粉系接着剤
	寝室	床用ビニルシート接着剤 床用ビニルシート	PVC シルク壁紙
D、E		溶剤型エポキシ系オンドルフローリング接着剤 合板オンドルフローリング	石膏ボード 澱粉系接着剤 PVC シルク壁紙
F、G	居間	溶剤型エポキシ系オンドルフローリング接着剤 合板オンドルフローリング	石膏ボード 澱粉系接着剤
	寝室	床用ビニルシート接着剤 床用ビニルシート	PVC シルク壁紙

表 6-3 内装仕上げ材（続き）

住 宅		天井	その他
A		石膏ボード 壁紙用糊	セラミックスコーティング剤 A 厨房家具（E ₂ 等級）
B		下地用活性炭紙 PVC シルク壁紙	セラミックスコーティング剤 B 電磁波遮蔽材（壁の一部） 厨房家具（E ₂ 等級）
C	居間	石膏ボード 澱粉系接着剤	家具（E ₂ 等級）
	寝室	PVC シルク壁紙	
D、E		石膏ボード 澱粉系接着剤 PVC シルク壁紙	厨房家具（E ₂ 等級） 収納家具（E ₂ 家具）
F、G	居間	石膏ボード 澱粉系接着剤	家具（E ₂ 等級）
	寝室	PVC シルク壁紙	

6.2.1 実測項目

図6-1の平面図に測定器具の設置点及び各測定点を示す。表6-4に測定場所及び測定項目を示す。温湿度、気中濃度、フラックス発生量、換気量について測定を行い、空気質測定にはパッシブ法を用いた。測定方法については後述する。

表 6-4 測定場所及び測定項目

測定項目		気中濃度		フラックス発生量	
		カルボニル化合物	VOCs	カルボニル化合物	VOCs
サンプラー		DSD-DNPH	VOC-SD	DSD-DNPH	VOC-SD
測定器具		-		Carbonyl 用小型セル	VOCs 用小型セル
設置高さ		床上 1.2m		床面・壁面（高さ 0.6-0.9m）・天井面	
A	居間			床・壁・天井	
B	居間			床・壁・天井	
C	居間			床・壁・天井	
	寝室			床・壁・天井	
	洋室 1	-		-	
	洋室 2	-		-	
D	居間			床・壁・天井	
E	居間			床・壁・天井	
F	居間			床・壁・天井	
	寝室			床・壁・天井	
	洋室 1	-		-	
	洋室 2	-		-	
G	居間			床・壁・天井	
	寝室			床・壁・天井	
	洋室 1	-		-	
	洋室 2	-		-	

表 6-4 測定場所及び測定項目（継続）

測定項目		換気量		外気濃度
		PFT 放散源	PFT 捕集	カルボニル化合物 / VOCs
サンプラー		-	VOC-SD	DSD-DNPH / VOC-SD
測定器具		Vial	-	-
設置高さ		壁面（高さ 1.5m）	床上 1.2m	床上 1.2m
A	居間	C ₆ F ₆		ベランダ
B	居間	C ₆ F ₆		-
C	居間	C ₇ F ₈		ベランダ
	寝室	C ₆ F ₆		
	洋室 1	C ₇ F ₈		
	洋室 2	C ₇ F ₈		
D	居間	C ₇ F ₈		1 階入口の外
E	居間	C ₆ F ₆		-
F	居間	C ₇ F ₈		ベランダ
	寝室	C ₆ F ₆		
	洋室 1	C ₇ F ₈		
	洋室 2	C ₇ F ₈		
G	居間	C ₇ F ₈		ベランダ
	寝室	C ₆ F ₆		
	洋室 1	C ₇ F ₈		
	洋室 2	C ₇ F ₈		

6.2.2 測定法概要

(1) 温湿度

化学物質は温湿度により放散性状が変わるため温湿度の測定が必要である。メモリー式温湿度計（ESPEC RS-11 Thermo Recorder）を用い、各サンプリングポイント及び PFT 放散源周辺に設置した。全ての測定点において 5 分間隔で測定を行った。

(2) 気中濃度

カルボニル化合物の捕集に拡散サンプラー（DSD-DNPH）⁵⁾を、VOCsの捕集にパッシブサンプラー（VOC-SD）⁶⁾を用いて24時間捕集を行った。図6-2に測定に用いたサンプラーを示す。

DSD-DNPHはアセトニトリル溶出後HPLCで、VOC-SDはCS₂溶媒抽出後GC/MSで分析を行った。気中濃度の算出は式（6-1）による。

各物質の相当吸引速度はサンプラー製造会社の公表値を用いた。

$$C = \frac{M_a - M_{TB}}{K \times t} \times 10^6 \quad \dots (6-1)$$

C : 気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

M_a : 測定用サンプラーの捕集総重量 [μg]

M_{TB} : トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]

K : 相当吸引速度（Sampling Rate）[ml/min]

t : 捕集時間 [min]

$$K = UR \times \frac{1}{60} \times \frac{273 + \theta}{273} \times 22.414 \times \frac{1}{MW} \times 10^3 \quad \dots (6-2)$$

MW : 対象物質のモル質量 [g/mole]

UR : Uptake Rate [$\text{ng}/(\text{ppb} \cdot \text{h})$]

(3) フラックス発生量測定

パッシブ法を用いた建材からの化学物質放散量測定法はフラックス発生量測定法⁷⁾と呼んでいる。本研究では筆者らによって開発された小型セル⁷⁾⁸⁾を使用し、床・壁・天井からのフラックス発生量を測定した。

図 6-2 に測定用小形容器を示す。容器はステンレス (SUS304) 材質の横 105×幅 68×高 69(mm) の容器である。カルボニル化合物測定用小型セルと VOCs 用の小型セルを使用した。実測風景と設置例を図 6-3 に示す。本研究では捕集時間を 24 時間とした。サンプラーは気中濃度と同様の方法で分析を行った。フラックス発生量は式 (6-3) から求めた。

$$J = \frac{M_a - M_{TB}}{A_{ad} \times t} \quad \dots (6-3)$$

J : フラックス発生量 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

A_{ad} : 容器下面と材料表面が面する面積 [m^2]

t : 捕集時間 [h]

M_a : 測定用サンプラーの捕集総重量 [μg]

M_{TB} : トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]



図 6-2 測定器具



小型セル（天井）及び気中濃度



小型セル（床）



小型セル（壁）

図 6-3 実測風景

(4) PFT 法を用いた換気量測定

本研究で用いた PFT 法¹⁰⁾は連続発生法（簡易一定発生法、濃度平均法）に属する¹¹⁾。

一般的にトレーサーガス法¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾はガス発生装置、制御装置、分析装置で構成されるガスモニター等の装置が必要であり、居住者が在室する状態での測定は困難である。本研究で用いた PFT 法は器具や装置等が不要で、住人の在室状態でも日常生活や睡眠等に支障をもたらさず数時間から数日間以上の平均換気量測定が可能である。更にトレーサーガスとして使用する PFCs（Perfluorocarbons）の種類を増やせば同時に多数室における換気量と室間空気交換量を求めることが出来る。

本研究では C_6F_6 と C_7F_8 が入ったバイアル瓶を放散源として一定放散させ、パッシブサンプラー VOC-SD で捕集を行った。実測時になるべく定常状態に近づくようにするため、測定前日に放散源を設置した。翌日に捕集用サンプラーを設置、24 時間捕集を行った。

6.3 実測結果

6.3.1 温湿度

温湿度測定結果を表 6-5 に示す。値は 24 時間平均値である。冬季実測（1 月）では、外気温度は平均 0 以下で低かったが室内は空気温度、各面付近の温度は 20 以上であった。韓国では温水式床暖房を利用しているため壁・天井より床面の温度が高いのが特徴である。特に住宅 C の寝室では床面付近の平均温度が 30 を超えていた。室内の相対湿度は 12~35%と低かった。

中間期実測（6 月）では外気温が 19.6~22.2、室内空気温度 24.9~25.5 であり、各面付近の温度は 25 前後であった。相対湿度は 53~61%であった。建材からの化学物質放散量は建材の表面温度が高いほど放散量が多くなる。そのため、季節により気中濃度に差が生じるが、今回の実測では対象住戸が異なるため季節による差異については論じることができなかった。

表 6-5 温湿度測定結果

住宅		A		B		C	
実測期間		1/14-15		1/14-15		1/14-15	
		冬季		冬季		冬季	
測定項目		温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
		[]	[%RH]	[]	[%RH]	[]	[%RH]
外気		-1.6	49	-2.2	47	-0.2	40
居間	室温	-	-	20.7	21	21.4	34
	床	25.2	15	22.4	17	24.0	27
	壁	22.9	18	20.9	21	20.9	35
	天井	24.1	18	20.6	20	20.9	35
寝室	室温					23.7	17
	床					30.3	12
	壁					23.5	17
	天井					22.7	18

表 6-5 温湿度測定結果（継続）

住宅		D		E		F		G	
実測期間		6/08-09		6/08-09		6/08-09		6/09-10	
		中間期		中間期		中間期		中間期	
測定項目		温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度	温度	湿度
		[]	[%RH]	[]	[%RH]	[]	[%RH]	[]	[%RH]
外気		19.6	74	19.6	74	21.7	60	22.2	67
居間	室温	24.9	57	24.9	61	24.8	55	25.5	56
	床	25.0	58	24.8	60	25.0	53	26.0	54
	壁	24.9	57	24.9	60	24.7	53	25.3	56
	天井	25.0	57	25.3	59	24.9	59	25.4	61
寝室	室温					-	-	-	-
	床					24.6	55	25.1	55
	壁					-	-	-	-
	天井					24.6	56	25.1	59

6.3.2 気中濃度

(1) カルボニル化合物の気中濃度

カルボニル化合物の気中濃度結果を図 6-4 に、VOCs の気中濃度結果を図 6-5 に示す。また、定性定量を行った VOCs40 物質の気中濃度を表 6-6 に示す。但し、相当吸引速度が定められていないため気中濃度が算出できない物質もある。

カルボニル化合物において、実験住宅の A、B では低い濃度を見せ、建材対策の効果が見られた。実住宅である他の 5 戸（8 室）においてはホルムアルデヒド濃度が高く C の寝室（ $83\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を除いた 7 室で厚生労働省指針値を超えており、その値は $202\sim 630\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

寝室よりは居間で濃度の高い傾向が見られた。韓国の住宅は一般的に SRC 或いは RC 構造となっていて構造物材からの放散は殆どないと見なせる。寝室には床-接着剤・PVC シート、壁-接着剤・壁紙、天井-プレナム・石膏ボード・接着剤・壁紙の仕上げである。一方、居間の床には合板オンドルフローリング（木質系強化オンドルフローリング）を設置している。また、玄関の靴棚、居間の家具、システムキッチンが入居前に設置されるのが普通である。これらが原因で寝室より居間で高濃度になったと考えられる。

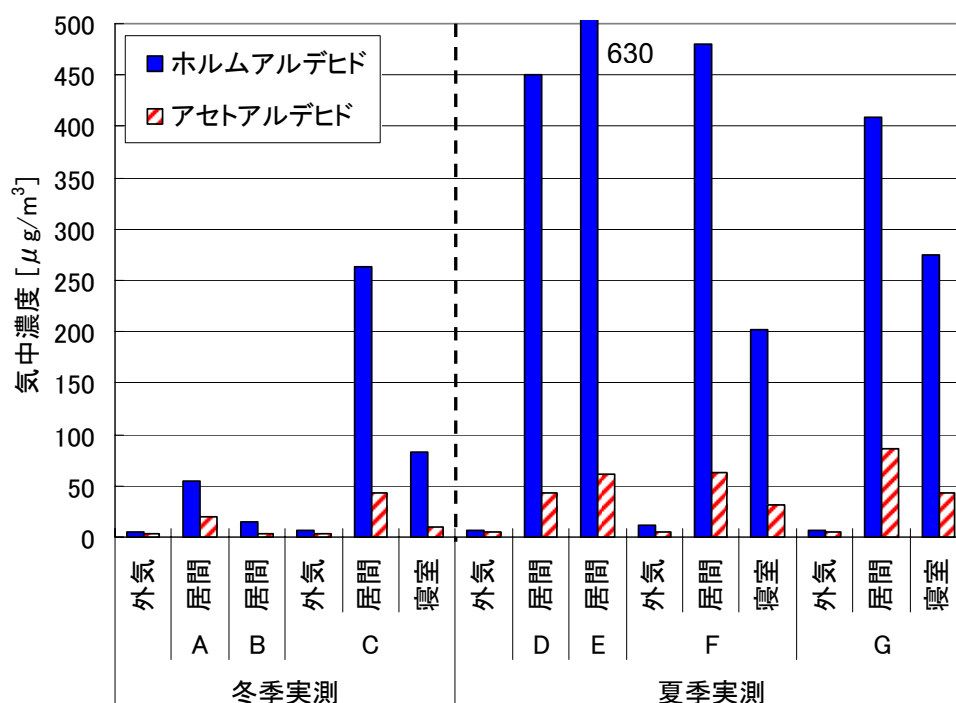


図 6-4 カルボニル化合物の気中濃度

(2) VOCs の気中濃度

VOCs は 40 物質について定性定量を行った。厚生労働省から指針値が定められている VOC 中、主に検出されたのはトルエン、エチルベンゼン、キシレン、スチレンの 4 物質であった。その他にノナン、デカン、ウンデカン、酢酸エチル、酢酸ブチル、メチルエチルケトンの濃度が高かった。

実験住宅 A と B の VOCs 濃度に顕著な違いが見られ、A ではトルエン濃度のみ指針値を超えたが他の物質の濃度は低かった。反面、ホルムアルデヒド対策だけが施された B ではトルエン、キシレンがそれぞれ指針値を超過していて、エチルベンゼンは指針値に近い値であった。

トルエン濃度は住宅 G の寝室を除いた 9 室において指針値を超え、その濃度範囲は $323\sim 4299\mu\text{g}/\text{m}^3$ で指針値を最大 16.5 倍まで超える室があった。エチルベンゼンは B、D、E において高い濃度となったが日本の指針値を超えたのは E の 1 室のみであった。キシレンは B、C の居間、D、E の 4 室において指針値を超えていて、最大値は住宅 B で $5627\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。スチレンは殆どの住宅で低濃度或いは検出

限界以下であったが住宅 C の居間で $138\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、F の居間と寝室で $191\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $189\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

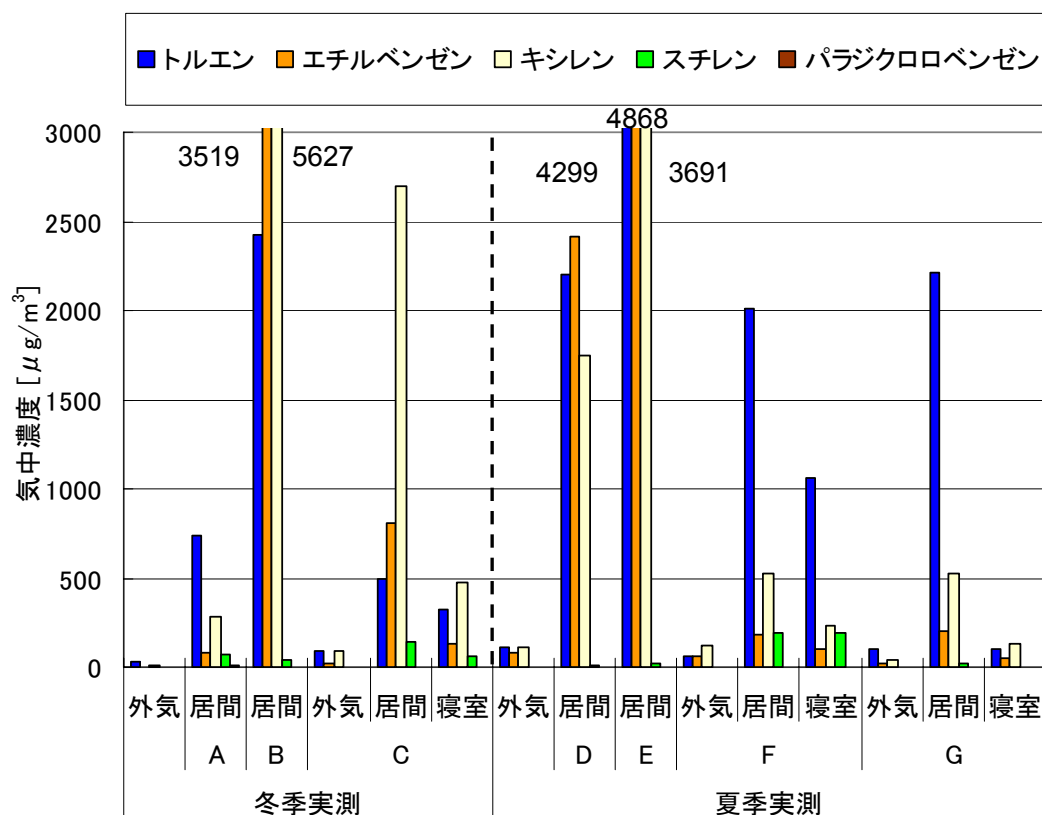


図 6-5 VOCs の気中濃度

表 6-6 定性定量した VOCs 40 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

分類	物質名	冬季実測					
		外気	A	B	C		
			居間	居間	外気	居間	寝室
脂肪族炭化水素類	n-ヘキサン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	2,4-ジメチルペンタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	イソオクタン	-	-	-	-	-	-
	ヘプタン	1	4	3	1	5	3
	オクタン	2	10	9	4	4	6
	ノナン	5	53	50	26	271	74
	デカン	17	93	67	44	736	258
	ウンデカン	26	91	79	57	556	237
	ドデカン	-	-	-	-	-	-
	トリデカン	-	-	-	-	-	-
	テトラデカン	-	-	-	-	-	-
	ペンタデカン	-	-	-	-	-	-
	ヘキサデカン	-	-	-	-	-	-
芳香族炭化水素類	ベンゼン	5	5	2	5	4	5
	トルエン	32	736	2420	88	495	323
	エチルベンゼン	5	86	3519	25	813	133
	キシレン	11	285	5627	88	2700	476
	スチレン	N.D	74	36	N.D	138	60
	1,3,5-トリメチルベンゼン	1	9	19	4	61	14
	1,2,4-トリメチルベンゼン	4	33	61	11	270	59
	1,2,3-トリメチルベンゼン	1	17	13	3	51	15
	1,2,4,5-テトラメチルベンゼン	-	-	-	-	-	-
テルペン類	-ビネン	N.D	50	41	N.D	10	13
	D-リモネン	N.D	N.D	159	N.D	75	37
ハロゲン類	クロロホルム	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	1,1,1-トリクロロエタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	1,2-ジクロロエタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	四塩化炭素	N.D	N.D	N.D	1	N.D	1
	トリクロロエレン	1	1	1	1	1	2
	1,2-ジクロロプロパン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	ジブromクロロメタン	-	-	-	-	-	-
	テトラクロロエレン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	p-ジクロロベンゼン	N.D	8	3	N.D	N.D	N.D
エステル類	酢酸エチル	9	-	8	6	-	6
	酢酸ブチル	1	1	8	5	10	5
アルデヒド・ケトン類	メチルイソプロピルケトン	14	105	144	23	229	175
	メチルイソブチルケトン	1	N.D	8	2	9	3
	ノナール	-	-	-	-	-	-
	デカール	-	-	-	-	-	-
アルコール	1-ブタノール	N.D	N.D	8	N.D	7	N.D

N.D. : 検出限界以下 - : 相当吸引速度が定められていないため気中濃度算出が出来ない物質

分類	物質名	夏季実測								
		外気	D	E	F			G		
			居間	居間	外気	居間	寝室	外気	居間	寝室
脂肪族炭化水素類	n-ヘキサン	8	N.D	N.D	5	14	27	6	N.D	N.D
	2,4-ジメチルペンタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	イソオクタン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ヘプタン	6	2	5	5	9	18	2	6	3
	オクタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	ノナン	5	10	20	10	22	13	5	10	N.D
	デカン	8	25	39	12	58	26	14	36	17
	ウンデカン	8	18	36	17	78	42	N.D	48	18
	ドデカン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	トリデカン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	テトラデカン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ペンタデカン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ヘキサデカン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
芳香族炭化水素類	ベンゼン	5	2	4	2	2	2	3	4	1
	トルエン	114	2200	4299	58	2012	1056	102	2211	100
	エチルベンゼン	76	2416	4868	61	186	99	25	203	54
	キシレン	116	1744	3691	124	526	230	40	530	132
	スチレン	N.D	8	16	N.D	191	189	N.D	17	N.D
	1,3,5-トリメチルベンゼン	0	15	17	3	4	3	N.D	3	2
	1,2,4-トリメチルベンゼン	5	28	56	9	15	9	3	7	4
	1,2,3-トリメチルベンゼン	1	5	9	3	4	3	N.D	2	N.D
	1,2,4,5-テトラメチルベンゼン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
テルペン類	-ビネン	N.D	14	53	N.D	40	11	N.D	41	11
	D-リモネン	N.D	N.D	7	N.D	N.D	N.D	N.D	5	N.D
ハロゲン類	クロロホルム	N.D	N.D	N.D	2	N.D	N.D	2	2	N.D
	1,1,1-トリクロロエタン	N.D	N.D	N.D	2	N.D	N.D	1	N.D	N.D
	1,2-ジクロロエタン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	四塩化炭素	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	トリクロロエチレン	5	3	N.D	7	3	3	6	4	3
	1,2-ジクロロプロパン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	ジブromクロロメタン	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	テトラクロロエチレン	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	p-ジクロロベンゼン	N.D	N.D	4	N.D	N.D	N.D	N.D	3	2
エステル類	酢酸エチル	10	508	1007	11	N.D	N.D	12	N.D	N.D
	酢酸ブチル	12	28	64	98	174	86	39	186	56
アルデヒド・ケトン類	メチルエチルケトン	14	219	447	42	369	214	17	402	148
	メチルイソブチルケトン	5	35	72	9	24	11	11	65	17
	ノナール	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	デカール	-	-	-	-	-	-	-	-	-
アルコール	1-ブタノール	N.D	20	31	N.D	N.D	N.D	N.D	14	N.D

6.3.3 フラックス発生量

(1) カルボニル化合物のフラックス発生量

図 6-6 にカルボニル化合物のフラックス発生量測定結果を示す。

ホルムアルデヒド低放散建材が使われている A、B 共に $5\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以下で発生量が少ないことが確認できた。実住宅（8 室 24 ヶ所）においては住宅 C の寝室で $5\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 未満であったことを除き、23 ヶ所の測定点において $10\sim 171\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ のフラックス発生量となった。実住宅 5 戸、8 室 24 ヶ所の中 $5\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 未満は 1 ヶ所、 $5\sim 20\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ が 8 ヶ所、 $20\sim 50\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ が 13 ヶ所、 $50\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以上が 2 ヶ所であった。

傾向としては床・壁より天井からの発生量が多く、他の部位に比べ天井にはプレナムと石膏ボードがあり、プレナム内が高濃度になり室内に放散している可能性と、石膏ボードによる吸着或いは再脱着の影響の可能性が考えられる。2003 年発表された日本における新築戸建住宅に関する研究（丸元、田辺ら）¹⁴⁾ではホルムアルデヒドは壁・天井より床からの放散が多かったと報告している。日本の住宅では天井クロスとして壁紙のみが用いられることが多く天井からの放散は必ずしも高くない。

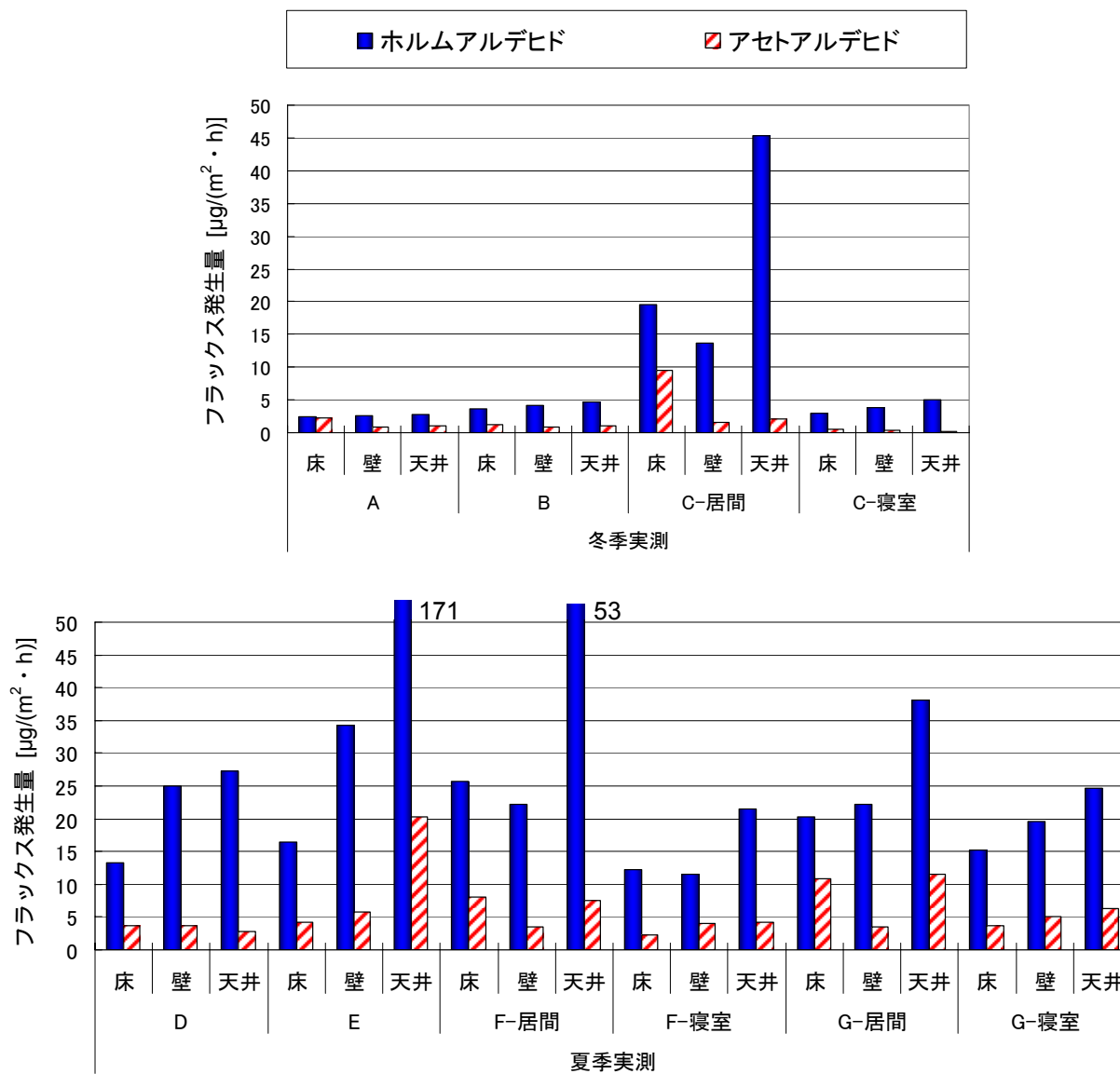


図 6-6 カルボニル化合物のフラックス発生量

(2) VOCs のフラックス発生量

図 6-7 に VOCs のフラックス発生量測定結果を示す。

A と B を比べると A ではトルエンの発生量が多いが他の物質の発生量は少なく建材対策の効果が見られた。内装工事直後である住宅 B、D、E とある程度時間が経ち入居直前である住宅 F、G の傾向を比べると B、D、E ではトルエン、エチルベンゼン、キシレンの発生量が共に多いが、F、G ではエチルベンゼン、キシレンの発生量に比べトルエンのみが多く発生されていることが分かった。これは工事完了から時間の経過につれエチルベンゼンとキシレンの放散は減るがトルエンの減衰は遅いことであり、内部拡散型建材あるいは室内表面ではなく裏に隠れている部材、断熱材等からの放散が考えられる。

部位別の放散量において、本研究結果からはホルムアルデヒドは床・壁より天井面の放散が多い傾向が見られたが、VOCs は部位別放散の特徴は見られなかった。2003 年の日本における新築集合住宅に関する研究（浅井、田辺ら）¹⁵⁾の報告では床・壁・天井からの化学物質放散量に顕著な差は見られなかったが、同年発表さらた新築戸建住宅に関する研究（丸元、田辺ら）¹⁴⁾では、トルエンは床・天井より壁からの放散が多かったと報告している。

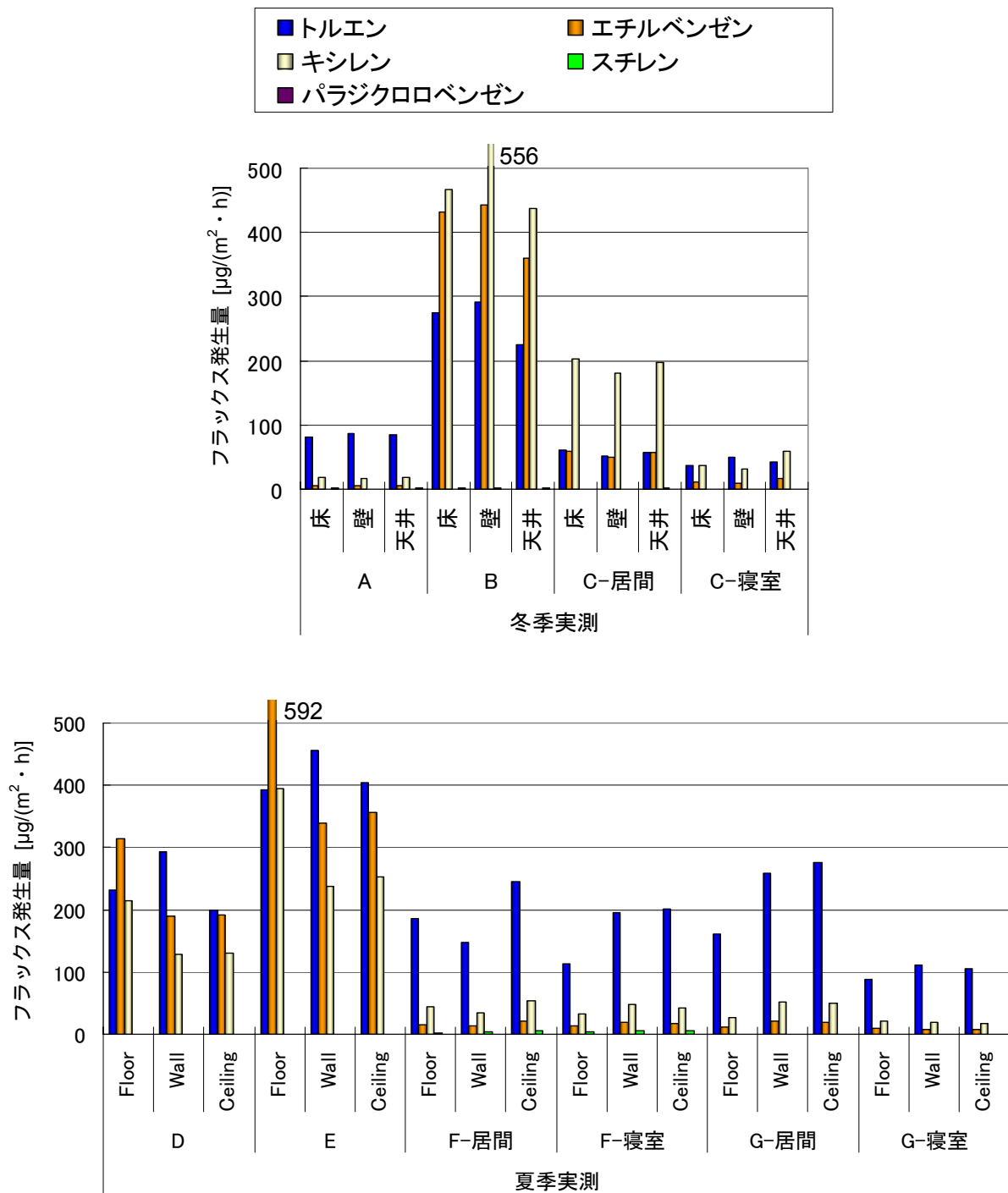


図 6-7 VOCs のフラックス発生量

(3) 族別フラックス発生量

定性定量された VOCs 40 物質を族別に分類しその発生量を積み上げたグラフを図 6-8 に示した。内装工事の終わったばかりの B、D、E に比べて入居を控えている C、F、G ではフラックス発生量が少なく、新しい建物ほど全発生量が多く、時間の経過と共に減衰が進んでいることが読み取れる。

物質の構成を見ると芳香族化合物が全体発生量の 71~97% (平均 91%) を、脂肪族化合物が 0~19% (平均 3%) を占めていた。テルペン類は平均約 1% 程度で木造住宅が多く杉材等天然木材を使用している日本の住宅と大きな差異が見られ、天然木材よりは合成材料の使用が多いことが確認できた。

他に住宅 D、E でエステル類が全体の 1~3% を、住宅 F、G ではケトン類が 4~8% を占めていた。

2001 年及び 2002 年の実大モデルルームを用いた研究 (浅井、伴野、田辺ら)^{16) 17) 18)}では、気中濃度と放散速度測定結果に関して芳香族、エステル類、その他が大きな割合を占めており、芳香族だけが目立つ傾向は見られない。また、2001 年の木造戸建実験住宅を測定した研究 (山口ら)¹⁹⁾では芳香族・酢酸ブチルの割合が高いが α -ピネンや D-リモネンのようなテルペン類とデカン、ウンデカン等の脂肪族も多く検出されている。2000 年 (荒井ら) と 2001 年 (桑沢ら) に報告された新築集合住宅に関する研究^{20) 21)}では気中で α -ピネンが占める割合が 5 割程度であった。

このように韓国新築集合住宅において検出される物質が一部の物質に集中していることは日本の住宅とは対照的であった。日本の住宅には木材建材が多く使われることもあって、テルペン類が多く検出される一方、建材に使われる化学物質が多様化していることが原因と考えられる。

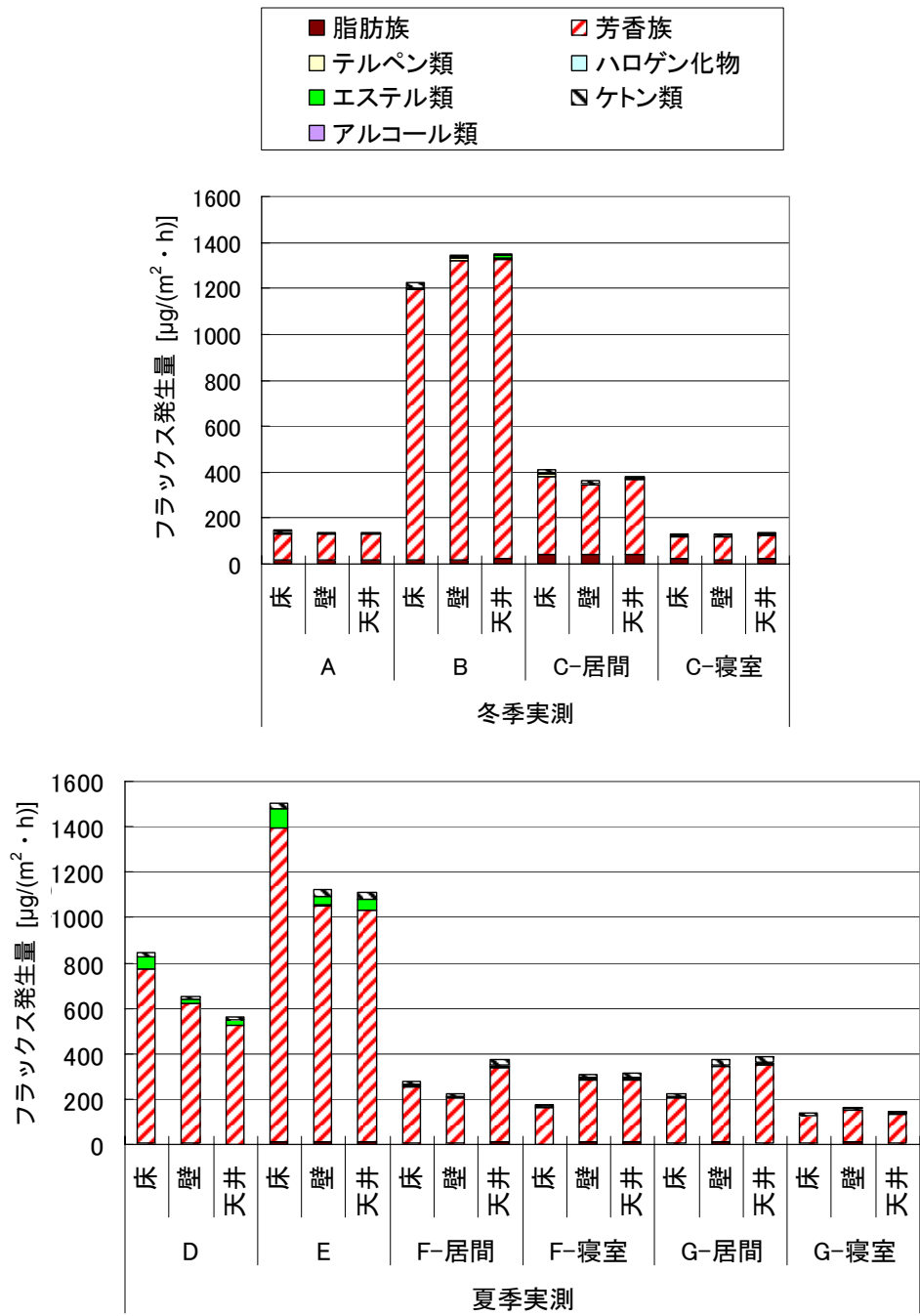


図 6-8 VOCs 40 物質の族別フラックス発生量

6.3.4 換気量

換気量測定結果を表 6-7 に示す。全住宅に常時換気設備は設けられていなかった。

A では 0.4 回/h、D では 0.6 回/h でやや多くなっているがその他の住宅では 0.2~0.3 回/h の結果となった。測定時には外部と直接面しているベランダの窓とドアを全て開放し、ベランダ内側の開口部のみを閉めた状態で行ったため外部の開口部まで閉めた場合、換気量はもっと少なくなると予測される。日本で定めている必要換気回数は 0.5 回/h であり、韓国基準では 0.7 回/h であるが、冬夏季共に隙間による自然換気のみでは必要換気量確保は難しく、窓開け換気や浴室・厨房に設置されている排気ファンを用いた換気等、居住者による計画的な換気が必要である。住宅 D は同じ条件の住宅 E に比べて、換気量が増え有害化学物質の気中濃度は一律に低い。内装工事が終わったばかりでまだ作業員の出入りがあったことから換気量が増えたことが考えられる。

表 6-7 換気量測定結果

		室容積 [m³]	換気量 [m³/h]	換気回数 [回/h]	
A		79.8	28	0.4	
B		79.8	21	0.3	
C	居間	145.1	29	0.2	0.2
	寝室	36.1	13	0.4	
D		140.4	80	0.6	
E		140.4	33	0.2	
F	居間	166.9	51	0.3	0.3
	寝室	43.6	7	0.2	
G	居間	181.4	27	0.2	0.2
	寝室	51.6	18	0.3	

6.4 まとめ

韓国の新築実験集合住宅2戸及び新築集合住宅5戸、総10室における室内空気質実測調査をパッシブ測定法を用いて行った。測定項目はカルボニル化合物及びVOCsの室内気中濃度、各面からのフラックス発生量、換気量、温湿度であった。以下に結果を纏める。

- 1) カルボニル化合物の気中濃度において、傾向として寝室より居間での濃度が高かった。実験集合住宅A、Bでは低い濃度であり建材対策の効果が見られた。実住宅5戸においてはホルムアルデヒドの濃度が高く住宅Cの寝室を除いた7室で厚生労働省指針値を超えていた。アセトアルデヒドは10室中3室において同指針値を超えていた。
- 2) VOCs気中濃度において、定性定量されたVOCs40物質の中、主に検出されたのはトルエン、エチルベンゼン、キシレン、スチレンの4物質であった。実測対象住宅7戸、総10室中トルエン濃度は9室、エチルベンゼンは1室、キシレンは4室で厚生労働省指針値を超えた。スチレン濃度において同指針値を超える室は無かった。
- 3) カルボニル化合物のフラックス発生量においては、ホルムアルデヒド低放散建材が使われている住宅A、Bでは $5\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以下で発生量が少なかった。一般建材仕様の実住宅5戸、8室24ヶ所中 $5\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 未満は1ヶ所、 $5\sim 20\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ が8ヶ所、 $20\sim 50\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ が13ヶ所、 $50\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以上が2ヶ所であった。床・壁より天井からの発生量が多い傾向が見られた。
- 4) VOCsフラックス発生量測定結果、内装工事直後であった住宅B、D、Eではトルエン、エチルベンゼン、キシレンの3物質の放散量が多かったが、内装工事からある程度時間が経った住宅F、Gでは他の2物質に比べてトルエンが高い放散を見せていた。ただし、後群に属する住宅Cではこのような傾向は見られなかった。部位別放散特性の傾向は見られなかった。
- 5) 定性定量された40物質の中、芳香族化合物が全体発生量の平均91%を、脂肪族が平均3%を占めていた。テルペン類は平均1%程度で少なかった。
- 6) 換気量測定結果、住宅A (0.4回/h)、D (0.6回/h) を除く5戸の住宅で0.2~0.3回/hの換気回数であり、バルコニーの外側開口部を閉める実居住状態では換気量はさらに少なくなると予想されるため、隙間による自然換気だけでは必要換気量の確保が難しいと考えられる。窓開け換気や排気ファンを用いた換気等、居住者による計画的な換気が必要である。

【参考文献】

- 1) 韓国環境部：多衆利用施設等の室内空気質管理法、2003年5月制定・公布、
2004年5月施行、<http://www.me.go.kr/>
- 2) 韓国環境部：環境部報道資料、2005
- 3) 韓国環境部：多衆利用施設等の室内空気質管理法施行規則一部改訂令、2005
- 4) 권오현 (クォンオヒョン)：지역별 주거수준 비교분석 (地域別住居水準比較分析)、한국
건설산업연구원 건설산업동향 (韓国建設産業研究院建設産業動向)、2001-37号、2001
- 5) スペルコ：DSD-DNPH取扱説明書
- 6) スペルコ：VOCs捕集用 (溶媒抽出タイプ) 高性能パッシブサンプラーVOC-SD取扱説明書
- 7) 青木龍介、松本仁、阿久津太一、熊谷一清、田辺新一：建材から発生するアルデヒド類のパ
ッシブ測定法 (ADSEC) の開発 その4 ADSECとFLEC、ADPACとの比較、日本建築学会
大会学術講演概要集、D-2、pp.853-854、2001
- 8) 窪田圭佑、金勲、田渕誠一、石川祐子、長谷川あゆみ、田辺新一：パッシブ測定法を用いた
室内空気質評価 その17 パッシブフラックス法による測定とチャンバー法との比較、日本
建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.909-910、2005
- 9) Fisk WJ, Faulkner D, and Hodgson AT.: The pollutant control index : a new method of characterizing
ventilation in commercial buildings, Proceedings of Indoor Air '93, Vol.5, pp.9-14., 1993
- 10) Seiichi Tabuchi, Marina Asai, Satoshi Sakai, Noriko Marumoto and Shin-ichi Tanabe : Application of
a simple method for detection and quantifying VOC sources, Proceedings of Roomvent 2004, Indoor
Air Quality, CD-ROM, 2004
- 11) 柏原誠一、吉田和之、田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、田辺新一：パッシブ測定法を
用いた室内空気質評価 その18 CO₂一定濃度法を用いた戸建住宅実測、日本建築学会大会
学術講演概要集、D-2、pp.911-912、2005
- 12) 田渕誠一、窪田圭佑、東田浩毅、金勲、吉田和之、柏原誠一、田辺新一：パッシブ測定法を
用いた室内空気質評価 その19 PFT法を用いた換気量簡易測定法検討実測、日本建築学
会大会学術講演概要集、D-2、pp.913-914、2005
- 13) 空気調和・衛生工学会：トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法、空気調和・衛生工
学会規格、2004
- 14) 丸元典子、田渕誠一、浅井万里成、酒井聡至、松本仁、田辺新一：パッシブ測定法を用いた
室内空気質評価 その8 新築戸建住宅における放散速度実測、日本建築学会大会学術講演概
要集、D-2、pp.893-894、2003
- 15) 浅井万里成、田渕誠一、酒井聡至、丸元典子、松本仁、浅井靖史、田辺新一：パッシブ測定
法を用いた室内空気質評価 その6 新築集合住宅における放散速度・気中濃度実測、日本建
築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.889-890、2003
- 16) 浅井靖史、村江行忠、田辺新一、伴野正幸、城田修司、大阪谷彰、佐々木亮治：実大モデル
ルームを用いた室内化学物質濃度・放散速度に関する研究 その1 長期間における気中濃度
実測結果、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.865-866、2001

- 17) 伴野正幸、浅井靖史、村江行忠、田辺新一：実大モデルルームを用いた室内化学物質濃度・放散速度に関する研究 その2 部位別寄与率・気中濃度の予測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.865-866、2001
- 18) 伴野正幸、白井良太、丸元典子、浅井靖史、村江行忠、田辺新一：実大モデルルームを用いた室内化学物質濃度・放散速度に関する研究 その4 部位別放散速度測定及び気中濃度の予測、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.883-884、2002
- 19) 山口紀宏、桑沢保夫、坊垣和明：木造戸建実験住宅におけるアルデヒド類、VOCs実測調査－家具、電化製品搬入前後による室内濃度変化－、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.911-912、2001
- 20) 荒井良延、寒河江昭夫、箱崎英男、権藤尚、武廣絵里子、涌井健：新築集合住宅における空気質環境（その3）健康配慮住宅のための建築設備仕様の検討、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.761-762、2000
- 21) 桑沢保夫、坊垣和明：完成直後の集合住宅における室内空気質の調査、日本建築学会大会学術講演概要集、D-2、pp.917-918、2001

第 7 章

総括

7. 総括

室内空間における化学物質汚染、臭気、カビ、ダニ等の微生物汚染の問題は現在でも指摘されている。また、常時換気システムを居住者が停止させたり、管理不足により換気能力が低下した場合など、居住状態での換気量の実態を把握することが必要とされている。

シックハウス対策の基本となるのは有害化学物質の放散が少ない建材を使用する「発生源対策」と適切な換気を確保する「換気対策」である。室内空気質評価のためには気中濃度、建材からの放散量、換気量を把握することが重要である。

気中濃度測定には吸引ポンプを用いたサンプリング法、放散量測定にはダイナミックヘッドスペース法として JIS（日本工業規格）A 1901 と ISO（国際標準化機構）16000-9 で定められたチャンバー法、換気量測定には SF₆（六フッ化硫黄）、CO₂（二酸化炭素）等のトレーサーガスを用いる測定法がよく用いられている。これらはアクティブ法と呼ばれ、精密な測定が可能であるが大規模な装置を必要とする。

このような背景で、本研究では現場や実住宅における室内空気環境を、機器が不要で、精度及び再現性を確保しながら騒音などがなく簡便に測定ができる手法の提案と開発を目的とし、パッシブサンプラーを使用する気中濃度測定法、建材からの化学物質放散量測定法（フラックス発生量測定法）、PFT（Perfluorocarbon Tracergas）を用いた換気量測定法に関する研究を行った。また、提案した手法を用いて実住宅における空気質測定を行った。

以下に、本論文における各章の内容をまとめる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べると共に、室内化学物質汚染に関連した13物質の物性、健康影響に関して文献調査を行った。また、指針、関連法規及びこれまで行われてきた室内空気汚染の実態調査研究結果、既存のアクティブ測定法とパッシブ測定法について調査を行い、本論文の位置づけを明確にした。

第2章「パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法」では、本研究で開発したフラックス発生量測定器具である小型セルの性能試験を行った結果をまとめた。

断熱材として使用される EPS（Expanded Polystyrene foam：発泡ポリスチレン）3種類からの放散量試験を小型セル法及び小型チャンバー法を用いて行った。小型セルによる結果は、同一試料に対していずれもよい相関が得られ、再現性も高いことが確認された。小型セルの1日目測定値は小型チャンバー法より高くなり、3日目以降はチャンバー法と等しい結果が得られている。1日目測定値で差が生じた原因として小型セルは試験片設置直後から24時間のサンプリングを行うのに対して、小型チャンバー法は試料設置から24時間後にサンプリングを行うためである。

接着剤からの化学物質放散量測定においては、既存のガラス板に接着剤を塗布した試験片（JIS A 1902）は初期放散が高く短時間で放散量が少なくなるため、けい酸カルシウム板を試験片基材として用いる方法を提案し、接着剤の放散量試験を行った。けい酸カルシウム板試験片は材料中の物質拡散により長時間に渡って放散し、再現性も高いことが確認された。小型セルと小型チャンバーとの比較試験では EPS 試験の結果と同様の傾向が得られた。更に、接着剤に含まれるトルエンとキシレンの添加量を変えた 4 種類の試験片を作製し、放散量試験を行った。小型チャンバー試験結果では添加量の違いによる放散速度の差は見られたものの、添加量と放散速度の間に比例関係は得られなかった。一方、小型セル試験では添加量とフラックス発生量の間に相関が見られた。養生条件による比較試験では、けい酸カルシウム板は湿度の影響を受けやすく、含水率を成り行きにした場合にはフラックス発生量に最大 30% 程度の偏差が生じたため、含水量を一定にして試験を行うことが必要であることが分かった。

第3章「PFT 換気量測定法」では、本論文における PFT を用いた換気量測定法について述べた。PFT 放散源の開発及び放散量の温度依存性実験、PFCs（Perfluorocarbons：過フッ化炭素類）3 物質に対するパッシブサンプラーのサンプリングレート算出実験を行った。

バイアルに 1mm 厚及び 5mm 厚のシリコン膜、更に膜に穴径を調整したアルミ板を貼り合わせることで放散量を調整する PFT 放散源を開発し、温度変化による放散量変化の補正式を実験から算出した。また、パッシブサンプラーの C_6F_6 、 C_7F_8 、 C_7F_{14} に関するサンプリングレート算出実験を $23.8m^3$ ステンレス製大型チャンバーで換気量と放散量を変えた 5 条件で行い、結果からサンプリングレートは雰囲気温度 $25^\circ C$ 基準、 $C_6F_6=42.0ml/min$ 、 $C_7F_8=44.2ml/min$ 、 $C_7F_{14}=36.0ml/min$ が得られた。換気量算定式に関しては連立方程式を確定的方法で解く方法から、拘束条件を加えた最小二乗法を取り入れた統計的方法を用いることで、精度向上を図り PFT 法の信頼度を高めた。

第4章「パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF_6 法、 CO_2 法、差圧測定法の周期変動条件下における比較実験」では、PFT 法の外乱による影響を把握するため実験集合住宅において比較実験を行った。

PFT 法はトレーサーガスの放散とサンプリングをパッシブ手法を用いて行うためアクティブ法に比べて測定時間が長く、外乱変動や室内に一樣流が発生した場合は誤差が大きくなる可能性がある。そのため、南北面外壁における差圧を一定に調節できる設備を設けた多数室を有する実大実験集合住宅において外乱変動を模擬し、4 種類の圧力条件下において各種の換気量測定法の比較を行った。

一般住宅で見られるような機械換気の下では、PFT 法は他の測定法と同等な結果となったが、風向が反転する周期変動条件下では、誤差が生じることが確認された。そのため、PFT 法が含む理論誤差について検討し、風向反転周期が長くなると誤差は大きくなり、0.5 回/h 換気条件下で 12 時間毎の反転がある場合は理論的に 30% の誤差が、1 時間毎の反転条件では 4% の誤差が生じることが明らかになった。この結果から、定常状態到達時間に比べ気流方向が長周期をもって反転する場合、PFT 法は気中濃度の測定が正確に行われても外気導入量を過大評価することが分かった。

第5章「多数室を有する戸建住宅における換気量測定」では、2階建戸建住宅（第1種換気）、同一分譲地区内の新築戸建住宅2戸（第1種換気）、工場地域の集合住宅（第3種ハイブリッド換気）、3階建戸建住宅（2種類の第3種セントラル換気）において、各換気システムの稼働条件、自然換気との組み合わせなどの換気条件を変化させ、PFT法による換気量測定をSF₆、CO₂トレーサーガス法、風量測定法による測定と同時に行った。

これらの実測ではPFT法による換気量測定の結果は他の測定法によるものと同等になった。PFCs物質の違いが換気量測定結果に影響を及ぼす可能性について検討し、住戸全体の換気量に関してはC₆F₆-C₇F₈、C₆F₆-C₇F₁₄の組み合わせによらず等しい結果が得られた。また、平面的なゾーン分けに加えて、3階建戸建住宅では縦方向にゾーン分けをして測定を行い、PFT換気量測定法の精度の確認ができた。

PFT法を用いた換気量測定法は外気導入量のみならず室間空気交換量も算定することができる。その結果、第1種換気システムは信頼性が高いが、室内ドアの開閉状態により圧力バランスが変化し、各給気口からの外気導入量が変わることが分かった。外乱の影響により給気口からの外気導入量が少なくなる住戸が存在した。また、室毎の外気導入量のバランスが悪い例が見られた。換気設備のメンテナンス不足により1年後に5割程度まで換気性能が低下した住戸が確認された。

PFT法はパッシブ測定法として、住戸全体の外気導入量測定と共に、室間の空気交換量を測定する際に精度を確保しながら簡便に測定ができる方法であり、実際の住宅での測定にも有効であることが分かった。

第6章「パッシブ法を用いた韓国の新築集合住宅における空気質実態調査」では、韓国の新築集合住宅7戸を対象に、気中濃度、床・壁・天井面からのフラックス発生量、PFT法を用いた換気量測定を同時に行った。

室内空気汚染の対策が行われ、化学物質低放散建材を用いた住戸においては建材対策の効果が見られたが、従来型建材を用いた住宅では化学物質の気中濃度が高く、各面からのフラックス発生量も高い例が存在した。更に芳香族化合物の放散量が多い傾向が見られた。換気量は冬季であっても隙間からの自然換気のみでは0.2~0.4回/hの換気回数しか確保できず、機械換気設備を用いた計画換気の必要性が示された。

第7章は「総括」として、本論文における各章の内容をまとめた。

本論文ではパッシブ法を用いて気中濃度、建材からの化学物質放散量、換気量の同時測定ができる手法について提案し、精度を確保しながら簡便に測定ができる方法として有効性と実用性を示した。

本研究が、室内空気質の実態調査における測定法の簡便化に貢献し、室内空気汚染による健康被害を減少させると共に室内空気環境の改善及び健康増進に役立つことを願う。

APPENDIX

記号一覧

記号一覧

A_0	: サンプラーの入口面積 [m^2]
A_{ad}	: 器具設置部分の建材表面積 [m^2]
C	: 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
\bar{C}	: 測定期間中の時間平均気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_A	: 環境濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_F	: 物質の吸着剤表面濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_i	: 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_o	: 外気濃度（流入物質の外気中濃度） [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_S	: 物質の建材表面濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
$C_{(t)}$: 時刻 t における対象物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
D	: 物質の拡散係数 [m^2/sec]
E	: 誤差（残差）
$EF_{(t)}$: 時間 t に空間で発生する対象物質の発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]
J	: 物質のフラックス [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
J_A	: 単位面積・単位時間当たりのフラックス発生量 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
K	: サンプリングレート（Sampling Rate：相当吸引速度） [mL/min]
L	: 拡散境界層厚さ [m]
L_0	: サンプラーの入口から捕集剤表面までの距離（拡散距離） [m]
M_A	: 物質 A の単位時間当たり放散量 [mg/h]
M_{TB}	: トラベルブランク用サンプラーの捕集総重量 [μg]
M_a	: 測定用サンプラーの捕集量 [μg]
M_θ	: 温度 $\theta^\circ\text{C}$ における単位時間当たり放散量 [mg/h]
MW	: モル質量 [g/mol]
P	: 圧力 [Pa]
P	: 差圧 [Pa]
Q	: 換気量、空気流量 [m^3/h]
$Q_{n,m}$: ZONE n から m への空気交換量 [m^3/h]
\bar{Q}	: 時間平均換気量 [m^3/h]
V	: 容積 [m^3]
W	: 物質の捕集量 [μg]
UR	: アップテイクレート（Uptake Rate） [$\text{ng}/(\text{ppb} \cdot \text{h})$]
V	: 空間の気積 [m^3]
X	: 距離 [m]

e : 自然対数
 k_R : 反応に関連した速度係数
 \overline{m} : 時間平均トレーサーガス発生量 [$\mu\text{g} / \text{h}$]
 $n_{(t)}$: 時間 t における換気回数 [h^{-1}]

s : 不確実性
 s_{source} : ドーザーからの放散量の偏差による不確実性
 s_{sampl} : サンプルリングの不確実性
 s_{meas} : 溶媒抽出及び分析の偏差による不確実性
 s_{inhom} : 空間におけるガスの均一分布の偏差による不確実性
 t : 測定時間 [h]
 Δt : 時間間隔 [h]
 v : 速度 [m/s]
 v_C : 対流速度 [m/s]
 θ : 温度 [$^{\circ}\text{C}$]

APPENDIX

図表一覧

図一覧

第1章 序論

- 図 1-1 20L 小型チャンバーシステムと 20L チャンバー
- 図 1-2 建材試験風景
- 図 1-3 大形チャンバー外観及びチャンバー内攪拌ファン
- 図 1-4 チャンバー内試験用建材設置風景
- 図 1-5 FLEC セル及び FLEC Air Controller
- 図 1-6 小型碗型チャンバー（小峰ら、2002）
- 図 1-7 フラスコ法試験概要図（日本塗料工業会）
- 図 1-8 境界層モデル
- 図 1-9 デシケータ法概要
- 図 1-10 逆デシケータ法概要
- 図 1-11 アルミ箔膜 TEA 濾紙法概要図（岩田ら、2000）
- 図 1-12 TEA-Dish 測定風景（岩田ら）
- 図 1-13 PFS 外観
- 図 1-14 PFS 断面図（柳澤ら、2002）
- 図 1-15 DSAC 外観（村江ら、2004）
- 図 1-16 DSAC 概要図（村江ら、2004）
- 図 1-17 現場実測用小型セル
- 図 1-18 建材試験用小型セル
- 図 1-19 パッシブサンプラー及び小型セル
- 図 1-20 小型セルの詳細図
- 図 1-21 各 PFT 構造式
- 図 1-22 BNL/AIMS の PFT 源概要
- 図 1-23 Stymne らのトレーサーガス源
- 図 1-24 Fisk らの PFT 放散源
- 図 1-25 Stymne らのパッシブサンプラー
- 図 1-26 3 ゾーンのモデル
- 図 1-27 本論文の構成及びフロー

第2章 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法

- 図 2-1 小型セルによる回収率試験
- 図 2-2 直接添加による回収率試験
- 図 2-3 建材試験用小型セル及び建材試験風景
- 図 2-4 EPS 結果
- 図 2-5 EPS 結果
- 図 2-6 EPS 結果
- 図 2-7 養生時間の定義

- 図 2-8 試験片完成図
- 図 2-9 試験片作製手順
- 図 2-10 端部断面詳細
- 図 2-11 小型セルによるフラックス発生量測定試験概要図
- 図 2-12 小型チャンバーによる放散速度試験概要図
- 図 2-13 小型チャンバー法による放散速度試験結果
- 図 2-14 小型セル法によるフラックス発生量測定結果（左右平均値）
- 図 2-15 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較（けい酸カルシウム板 12mm）
- 図 2-16 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較（けい酸カルシウム板 8mm）
- 図 2-17 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較（けい酸カルシウム板 6mm）
- 図 2-18 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較（ガラス板）
- 図 2-19 小型セルによるフラックス発生量試験の概要図
- 図 2-20 20L 小型チャンバーによる放散速度試験の概要図
- 図 2-21 添加量変化試験の 20L 小型チャンバーによる放散速度試験結果
- 図 2-22 添加量変化試験の小型セルによるフラックス発生量試験結果
- 図 2-23 小型セル法における添加量と捕集量の関係
- 図 2-24 0.05%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較
- 図 2-25 0.1%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較
- 図 2-26 1.0%Wt 添加条件のフラックス発生量と放散速度試験結果の比較
- 図 2-27 養生条件によるフラックス発生量比較試験結果

第 3 章 PFT 換気量測定法

- 図 3-1 PFT 放散源
- 図 3-2 PFT 放散源の温度依存性実験概要図
- 図 3-3 実験風景
- 図 3-4 C_6F_6 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 0.5mm）
- 図 3-5 C_6F_6 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.0mm）
- 図 3-6 C_6F_6 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.5mm）
- 図 3-7 C_6F_6 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 2.0mm）
- 図 3-8 C_7F_8 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 0.5mm）
- 図 3-9 C_7F_8 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.0mm）
- 図 3-10 C_7F_8 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.5mm）
- 図 3-11 C_7F_8 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 2.0mm）
- 図 3-12 C_7F_{14} 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 0.5mm）
- 図 3-13 C_7F_{14} 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.0mm）
- 図 3-14 C_7F_{14} 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 1.5mm）
- 図 3-15 C_7F_{14} 単位時間当たり放散量と温度との関係（シリコン膜厚さ 2.0mm）
- 図 3-16 パッシブガスチューブ概要図
- 図 3-17 PTFE-tube 電子顕微鏡拡大図

- 図 3-18 大形チャンバー平面図
- 図 3-19 パーミエーションチューブ PFT 放散源
- 図 3-20 クリンプバイアル PFT 放散源
- 図 3-21 サンプルングレート算出実験概要図
- 図 3-22 サンプルングレート実験風景
- 図 3-23 C_6F_6 の気中濃度と捕集量の関係
- 図 3-24 C_7F_8 の気中濃度と捕集量の関係
- 図 3-25 C_7F_{14} の気中濃度と捕集量の関係

第4章 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF_6 法、 CO_2 法、差圧測定法の 周期変動条件下における比較実験

- 図 4-1 実験集合住宅外観及び換気ダクト
- 図 4-2 実験集合住宅平面図及び各測定点
- 図 4-3 加圧用ファン及びコントローラー・タイマー
- 図 4-4 PFT ドーザー、サンプラー概要図
- 図 4-5 Multi-Gas Monitor (SF_6 法)
- 図 4-6 多数室換気測定器 (CO_2 法)
- 図 4-7 風圧測定板及び微差圧計
- 図 4-8 南北面の差圧測定結果
- 図 4-9 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件 1)
- 図 4-10 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件 2)
- 図 4-11 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件 3)
- 図 4-12 各測定法における外気導入量の時間変動 (条件 4)
- 図 4-13 理論気中濃度経時変化 (気流反転時間間隔 : 6、2、1 時間)

第 5 章 多数室を有する戸建住宅における換気量測定

- 図 5-1 メモリー式温湿度計
- 図 5-2 バイアルを用いた PFT 放散源概要図
- 図 5-3 サンプラー概要図
- 図 5-4 マルチガスモニター及び測定風景
- 図 5-5 多数室換気測定器及び測定風景
- 図 5-6 風量測定器及び測定風景
- 図 5-7 気象観測機器設置風景
- 図 5-8 2 階建戸建住宅の外観及び平面図
- 図 5-9 各測定項目の設置点
- 図 5-10 ステップダウン法による SF_6 濃度変化
- 図 5-11 PFT 法 II による換気量算出結果図 [m^3/h]
- 図 5-12 同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸の配置図及び住宅外観、平面図
- 図 5-13 気密測定風景

- 図 5-14 換気量測定器具設置図
- 図 5-15 住戸 A における PFT 換気量算出結果図（第 1 種換気条件） [m³/h]
- 図 5-16 住戸 A における PFT 換気量算出結果図（自然換気条件） [m³/h]
- 図 5-17 SF₆ 法による換気量経時変化
- 図 5-18 CO₂ 法による換気量の経時変化
- 図 5-19 ZONE1, ZONE2 の合計による各条件の外気導入量結果
- 図 5-20 住戸 A における各測定法による外気導入量の結果
- 図 5-21 換気量算出結果（住戸 B、第 1 種換気条件） [m³/h]
- 図 5-22 工業地域の集合住宅外観及び平面図
- 図 5-23 実測対象住宅の平面図及び換気設備の概要図
- 図 5-24 放散源及びサンプラー設置位置
- 図 5-25 1 次実測の各換気条件におけるゾーン間空気交換量及び外気導入量 [m³/h]
- 図 5-26 換気量測定器具設置図
- 図 5-27 2 次実測の PFT 法によるゾーン間空気交換量及び外気導入量 [m³/h]
- 図 5-28 3 階建戸建住宅の外観及び平面図
- 図 5-29 換気ファン及び換気口
- 図 5-30 第 3 種セントラル換気システムの概要
- 図 5-31 バイアルを用いた PFT 放散源概要図
- 図 5-32 換気量測定器具設置図
- 図 5-33 各条件における換気量算出結果 [m³/h]
- 図 5-34 CO₂ 法による外気導入量の経時変化（1 次実測）
- 図 5-35 条件 、条件 における換気量算出結果 [m³/h]
- 図 5-36 1 次実測結果
- 図 5-37 2 次実測結果
- 図 5-38 全実測における PFT 法結果と他の換気量測定法結果の比較

第 6 章 パッシブ法を用いた韓国新築集合住宅における空気質実態調査

- 図 6-1 測定対象住宅の平面及び各測定点
- 図 6-2 測定器具
- 図 6-3 実測風景
- 図 6-4 カルボニル化合物の気中濃度
- 図 6-5 VOCs の気中濃度
- 図 6-6 カルボニル化合物のフラックス発生量
- 図 6-7 VOCs のフラックス発生量
- 図 6-8 VOCs 40 物質の族別フラックス発生量

表一覧

第1章 序論

- 表 1-1 沸点による有機化合物の分類
- 表 1-2 WHO による VOCs の分類
- 表 1-3 室内気中濃度指針値（厚生労働省シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書 2002）
- 表 1-4 TVOC 濃度の人体影響 (ECA, 1992).
- 表 1-5 一般的性質
- 表 1-6 族別分類
- 表 1-7 各年の気中平均濃度と指針値超過率（国土交通省、2006）
- 表 1-8 デシケータ法の測定条件
- 表 1-9 デシケータ法と逆デシケータ法の比較
- 表 1-10 PFT の種類

第2章 パッシブ法を用いたフラックス発生量測定法

- 表 2-1 フラックス発生量測定法試験概要
- 表 2-2 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-3 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-4 EPS 測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-5 基材検討のための小型チャンバー試験結果（1 日目の捕集量 [ng]）
- 表 2-6 接着剤からの放散量試験条件（JIS A 1902 による）
- 表 2-7 試験条件
- 表 2-8 小型チャンバー法試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-9 小型セル法によるフラックス発生量測定結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-10 フラックス発生量と放散速度試験結果の比較 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-11 添加量変化試験条件
- 表 2-12 フラックス発生量と放散速度試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
- 表 2-13 小型セル法における添加量と捕集量の関係
- 表 2-14 養生条件によるフラックス発生量比較試験条件
- 表 2-15 養生条件による比較試験結果 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

第3章 PFT 換気量測定法

- 表 3-1 PFT 放散源の温度依存性実験条件
- 表 3-2 サンプルングレート算出実験条件
- 表 3-3 サンプルングレート算出実験結果
- 表 3-4 サンプルングレート算出結果 [25 条件]

第4章 パッシブ法を用いた PFT 換気量測定法と SF₆ 法、CO₂ 法、差圧測定法の 周期変動条件下における比較実験

- 表 4-1 圧力設定条件
- 表 4-2 換気量測定法の適用条件及び測定項目・測定機器
- 表 4-3 風量の予測近似式の係数
- 表 4-4 温湿度測定結果
- 表 4-5 外気導入量測定結果（外気導入量：m³/h、換気回数：回/h）

第5章 多数室を有する戸建住宅における換気量測定

- 表 5-1 各実測における目的及び概要
- 表 5-2 2 階建戸建住宅の実測タイムスケジュール
- 表 5-3 実測対象住宅の室面積及び室容積
- 表 5-4 測定機器及び測定条件
- 表 5-5 温湿度測定結果（各点平均温度・平均湿度）
- 表 5-6 風量測定結果 [m³/h]
- 表 5-7 各室における換気量算出結果（CO₂ 法）
- 表 5-8 各室における換気量算出結果（CO₂ 法）
- 表 5-9 SF₆ 濃度減衰法による換気回数算出結果
- 表 5-10 PFT 放散量及び測定結果（PFT 法）
- 表 5-11 測定室毎の換気量算定結果（PFT 法 I）
- 表 5-12 PFT 放散量（PFT 法、単位：[g]）
- 表 5-13 PFT 捕集量及び気中濃度（PFT 法）
- 表 5-14 外気導入量及び換気回数算出結果（PFT 法）
- 表 5-15 各測定法による換気回数算出結果のまとめ
- 表 5-16 同一分譲地区内の新築戸建住宅 2 戸における実測スケジュール
- 表 5-17 各住戸の床面積と容積
- 表 5-18 実測項目及び測定機器
- 表 5-19 温湿度測定結果
- 表 5-20 気密測定結果
- 表 5-21 風量測定結果 [m³/h]
- 表 5-22 住戸 A における PFT 測定結果（第 1 種換気条件）
- 表 5-23 空気交換量結果（第 1 種換気条件） [m³/h]
- 表 5-24 PFT 法換気量算出結果（第 1 種換気条件）
- 表 5-25 住戸 A における PFT 測定結果（自然換気条件）
- 表 5-26 空気交換量結果（自然換気条件） [m³/h]
- 表 5-27 PFT 法換気量算出結果（自然換気条件）
- 表 5-28 住戸 A における各換気条件による PFT 換気量測定結果
- 表 5-29 第 1 種換気条件における外気導入量及び換気回数算出結果
- 表 5-30 各ゾーンにおける外気導入量及び換気回数算出結果

表 5-31	ZONE1, ZONE2 の合計による換気量算出結果
表 5-32	住戸全体における換気量算出結果
表 5-33	住戸 B における PFT 測定結果
表 5-34	室間空気交換量結果 [m^3/h]
表 5-35	住戸 B における PFT 換気量算出結果
表 5-36	工業地域の集合住宅の概要
表 5-37	工業地域の集合住宅における実測換気条件概要
表 5-38	測定スケジュール
表 5-39	実測期間中の温湿度測定結果
表 5-40	1 次実測のハイブリッド換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-41	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-42	1 次実測のハイブリッド換気条件における換気量算出結果
表 5-43	1 次実測の自然換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-44	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-45	1 次実測の自然換気条件における換気量算出結果
表 5-46	サンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-47	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-48	換気量算出結果
表 5-49	1 次実測の各換気条件における外気導入量及び換気回数算出結果
表 5-50	2 次実測スケジュール
表 5-51	実測期間中の温湿度測定結果
表 5-52	2 次実測のハイブリッド換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-53	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-54	2 次実測のハイブリッド換気条件における換気量算出結果
表 5-55	2 次実測の常時第 3 種換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-56	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-57	換気量算出結果
表 5-58	2 次実測の自然換気条件におけるサンプラー捕集量及び気中濃度
表 5-59	各ゾーン間の空気交換量 [m^3/h]
表 5-60	2 次実測の自然換気条件における換気量算出結果
表 5-61	外気導入量及び換気回数算出結果
表 5-62	2 次実測の SF_6 法による平均外気導入量及び換気回数算出結果
表 5-63	2 次実測の CO_2 法による平均外気導入量及び換気回数算出結果
表 5-64	2 次実測の各測定法による換気量測定結果
表 5-65	PFT 法による 1 次実測と 2 次実測結果
表 5-66	3 階建戸建住宅の実測項目
表 5-67	3 階建戸建住宅の実測条件
表 5-68	3 階建戸建住宅の床面積及び容積
表 5-69	温湿度測定結果 (1 次実測)

表 5-70	風量（排気量）測定結果（1 次実測）
表 5-71	条件 における PFT 放散量及び放散速度（1 次実測）
表 5-72	条件 におけるサンプラー捕集量及び気中濃度（1 次実測）
表 5-73	条件 における PFT 放散量及び放散速度（1 次実測）
表 5-74	条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度（1 次実測）
表 5-75	条件 における PFT 放散量及び放散速度（1 次実測）
表 5-76	条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度（1 次実測）
表 5-77	条件 における PFT 放散量及び放散速度（1 次実測）
表 5-78	条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度（1 次実測）
表 5-79	各換気条件における PFT 法による外気導入量および換気回数算出結果（1 次実測）
表 5-80	CO ₂ 法による 24 時間平均濃度 [ppm]（1 次実測）
表 5-81	CO ₂ 法による平均外気導入量及び換気回数（1 次実測）
表 5-82	温湿度測定結果（2 次実測）
表 5-83	風量測定結果（2 次実測）
表 5-84	条件 における PFT 放散量及び放散速度（2 次実測）
表 5-85	条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度（2 次実測）
表 5-86	条件 における PFT 放散量及び放散速度（2 次実測）
表 5-87	条件 におけるサンプラー捕集量及び PFT 気中濃度（2 次実測）
表 5-88	各条件における PFT 法による外気導入量及び換気回数算出結果（2 次実測）
表 5-89	1 次実測及び 2 次実測における PFT 法及び CO ₂ 法換気量測定結果のまとめ
表 5-90	全実測における各換気量測定法による実測結果のまとめ

第 6 章 パッシブ法を用いた韓国新築集合住宅における空気質実態調査

表 6-1	韓国政府による 1 次、2 次実態調査結果と室内気中濃度基準値 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
表 6-2	実測対象住宅の概要
表 6-3	内装仕上げ材
表 6-4	測定場所及び測定項目
表 6-5	温湿度測定結果
表 6-6	定性定量した VOCs 40 物質の気中濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
表 6-7	換気量測定結果

APPENDIX

研究業績

研究業績

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
論文	パンプ測定法を用いた韓国新築集合住宅の室内空気質調査	日本建築学会環境系論文集	2006年10月	<u>金勲</u> 李晟在 成旻起 田辺新一
論文	PFT法を用いた換気量測定とSF ₆ 連続供給法、CO ₂ 一定濃度法、差圧測定法との比較実験	日本建築学会環境系論文集	2009年1月	<u>金勲</u> 田辺新一 田島昌樹 村江行忠
講演 (海外)	Performance Test Method for Evaluating the Reduction of Formaldehyde Concentration by Sorptive Building Materials with 20L Small Chamber System - Performance Test of Sorptive Materials For Formaldehyde -	大韓建築学会学術発表大会論文集	2008年10月	<u>Kim, H.</u> MOCHIDA, K. ARIGA, T. TANABE, S.
	Ventilation measurement using PFT method	Proceedings of Indoor Air 2008	2008年8月	Mochida, K. Hattori, M. Tanaka, Y. Kashihara, S. Yoshida, K. Tajima, M. <u>Kim, H.</u> Tanabe, S.
	Performance Test Method for Evaluating the Reduction of Formaldehyde Concentration by Sorptive Building Materials with 20L Small Chamber System – Development of New Air Flow Control Unit and Mass Transfer Coefficient –	大韓建築学会学術発表大会論文集	2007年10月	<u>金勲</u> 田辺新一 有賀隆男 小澤晃久 持田恵吾
	Comparison of PFT method with constant-injection, constant-concentration and theoretical calculation methods for ventilation measurement	Proceedings of Roomvent 2007	2007年9月	Tanaka, Y. Sato, K. Tajima, M. Tanabe, S. Murae, Y. <u>Kim, H.</u> Hattori, M.
	Survey of ventilation rate by passive PFT, CO ₂ constant concentration and airflow measurement method in three-storied detached house	Proceedings of Roomvent 2007	2007年9月	Hattori, M. Tanaka, Y. <u>Kim, H.</u> Kashihara, S. Yoshida, K. Tanabe, S.
	Comparison of PFT Method and 3 other Method for Ventilation Measurement	大韓建築学会学術発表大会論文集	2006年10月	<u>金勲</u> 田辺新一 田島昌樹 佐藤健一 村江行忠

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (海外)	Measurement and Evaluation of Indoor Air Quality by Passive Method in Korean Houses	Proceedings of Indoor Air 2005	2005 年 9 月	<u>Kim, H.</u> Tabuchi, S. Tanabe, S.
	Comparative Test on the Differences of Descriptions between KS-ISO/DIS and JIS in the Emission Test Chamber Method	大韓建築学会学術 発表大会論文集	2005 年 10 月	<u>Kim, H.</u> Funaki, R. Tanabe, S.
	Measurement of Indoor Air Quality in a newly Built Apartment Building by Passive Method	大韓建築学会学術 発表大会論文集	2004 年 10 月	Lee, S.J. <u>Kim, H.</u> Tanabe, S. et al.
	Passive Method for Measuring Air Concentration, Emission Rates from Building Materials and Ventilation Rate	大韓建築学会学術 発表大会論文集	2004 年 10 月	<u>Kim, H.</u> Tanabe, S. et al.
	An Experimental Study on the Efficiency of Ventilation of Korean-Paper (Han-Ji)	大韓建築学会釜山 慶南支会学術発表 大会論文集	2003 年 11 月	<u>Kim, H.</u> LIM, J.M. LEE, J.W.
	Thermal Environment Measurement of Hybrid HVAC System and Comparative Evaluation with Simulation	大韓建築学会釜山 慶南支会学術発表 大会論文集	2002 年 11 月	<u>Kim, H.</u> LIM, J.M. LEE, S.J. LEE, J.W.
講演 (国内)	半揮発性有機化合物(SVOC)の測定法に関する研究 その 7 ハウスダスト捕集装置の開発及び性能 評価実験	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	高野修一 岡田厚太郎 常本祥子 <u>金勲</u> 有賀隆男 田辺新一 吉野博
	半揮発性有機化合物 (SVOC) の測定法に関する研究 その 8 住宅におけるハウスダスト中 SVOC 濃 度測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	常本祥子 岡田厚太郎 高野修一 <u>金勲</u> 有賀隆男 田辺新一 吉野博
	異なる気密性能および換気方式における換気性 能比較実験	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	服部将志 田中祐輔 持田恵吾 <u>金勲</u> 柏原誠一 吉田和之 田辺新一

種別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (国内)	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 32 けい酸カルシウム板の有効拡散係数測定実験及び接着剤からの VOCs 放散量予測	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	田辺新一 田中祐輔 <u>金勲</u> 仲村寿人 井上稚雄 澤田幸三
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 33 小形チャンバー法による接着剤からの VOCs 放散量測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	仲村寿人 田中祐輔 <u>金勲</u> 田辺新一 井上稚雄 澤田幸三
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 34 防水材からの揮発性有機化合物放散評価に関する研究	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	田中祐輔 仲村寿人 <u>金勲</u> 田辺新一 井上稚雄 澤田幸三
	小型チャンバーADPAC を用いたアルデヒド類、VOC 放散量の測定に関する研究 その 16 新型気流制御ユニットの開発	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	<u>金勲</u> 持田恵吾 田辺新一
	小型チャンバーADPAC を用いたアルデヒド類、VOC 放散量の測定に関する研究 その 17 新型気流制御ユニットを用いた低減材性能試験	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	持田恵吾 <u>金勲</u> 田辺新一
	衛星点検・フェアリング組立作業空間における室内空気質実測 その 6 光学特性を用いた実空間における SVOC 評価方法の開発	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	岡田厚太郎 亀尾研介 田口博晃 <u>金勲</u> 田辺新一
	衛星点検・フェアリング組立作業空間における室内空気質実測 その 7 光学的性質による建材評価方法の開発	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	亀尾研介 田口博晃 <u>金勲</u> 田辺新一
	衛星点検・フェアリング組立作業空間における室内空気質実測 その 8 光学的性質による建材評価	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2008 年 9 月	田口博晃 亀尾研介 <u>金勲</u> 田辺新一
	準揮発性有機化合物 (SVOC) の測定・評価法の開発 (その 4) ハウスダスト中 DEHP 濃度の測定	空調調和衛生工学会大会学術講演解説 講演論文集	2008 年 8 月	岡田厚太郎 <u>金勲</u> 吉野博 田辺新一

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (国内)	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 (その 18) けい酸カルシウム板を用いた接着剤 からの VOCs 放散量測定	空調調和衛生工学会大会学術講演解 講演論文集	2008 年 8 月	仲村寿人 <u>金勲</u> 田辺新一 井上雅雄 澤田幸三
	PFT 法を用いた換気量測定法	空調調和・冷凍連 合講演会	2008 年 4 月	<u>金勲</u> 持田恵吾 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 17 PFT 一定発生法、CO2 一定濃度法、 風量測定法を用いた 3 階建の戸建住宅におけ る換気量測定	空調調和衛生工学会大会 学術講演 解講演論文集	2007 年 9 月	持田恵吾 柏原誠一 吉田和之 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 27 風量測定法を用いた 3 階建の戸建住宅 における換気量測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2007 年 8 月	<u>金勲</u> 持田恵吾 田中祐輔 服部将志 柏原誠一 松田克己 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 28 PFT 法を用いた 3 階建の戸建住宅にお ける換気量測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2007 年 8 月	服部将志 田中祐輔 持田恵吾 <u>金勲</u> 今井秀秋 吉田和之
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 29 CO2 一定濃度法を用いた 3 階建の戸建 住宅における換気量測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2007 年 8 月	持田恵吾 田中祐輔 服部将志 <u>金勲</u> 柏原誠一 吉田和之 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 30 基材選定のための拡散係数測定	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2007 年 8 月	窪田圭佑 田中祐輔 常本祥子 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 31 接着剤からの VOC フラックス発生量 測定法の開発	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2007 年 8 月	田中祐輔 窪田圭佑 常本祥子 <u>金勲</u> 田辺新一

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (国内)	パッシブ測定法を用いた室内空気中濃度、内装材からのフラックス発生量、換気量の同時測定	第 30 回人間－生活環境系シンポジウム報告書	2006 年 12 月	田中祐輔 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価	大気環境学会－特別分科会	2006 年 9 月	<u>金勲</u> 窪田圭佑 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 13 建材及び実住宅に対する臭気強度・許容度調査	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2006 年 9 月	亀尾研介 窪田圭佑 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 14 接着剤からの揮発性有機化合物放散量の測定法の開発	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2006 年 9 月	窪田圭佑 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 15 戸建住宅における換気量簡易測定法の性能検証実測	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2006 年 9 月	服部将志 柏原誠一 吉田和之 田中祐輔 <u>金勲</u> 窪田圭佑 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 16 実大実験住宅における換気量測定法の比較検討	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2006 年 9 月	<u>金勲</u> 田島昌樹 佐藤健一 村江行忠 田中祐輔 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 20 韓国の高層集合住宅における室内空気質実測調査	日本建築学会大会学術講演概要集	2006 年 9 月	谷英明 <u>金勲</u> 田中祐輔 服部将志 田辺新一 成旻起 李晟在 李承珉
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 21 秋田杉住宅における室内空気質環境調査	日本建築学会大会学術講演概要集	2006 年 9 月	亀尾研介 窪田圭佑 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 22 接着剤からの化学物質放散量簡易測定法の開発	日本建築学会大会学術講演概要集	2006 年 9 月	窪田圭佑 <u>金勲</u> 田辺新一

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (国内)	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 23 PFT 法を用いた戸建て住宅における換気量測定法検証実測	日本建築学会大会 学術講演概要集	2006 年 9 月	服部将志 田中祐輔 窪田圭佑 金勲 田辺新一 柏原誠一 吉田和之
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 25 実大実験集合住宅における PFT 法、 SF ₆ 一定発生法、CO ₂ 一定濃度法による換気量測定比較	日本建築学会大会 学術講演概要集	2006 年 9 月	田中祐輔 窪田圭佑 服部将志 金勲 田辺新一 田島昌樹 佐藤健一 村江行忠
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 26 実大実験集合住宅における差圧測定から算定した換気量と PFT 法の比較	日本建築学会大会 学術講演概要集	2006 年 9 月	金勲 窪田圭佑 田中祐輔 服部将志 田辺新一 田島昌樹 佐藤健一 村江行忠
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 14 韓国の集合住宅における室内空気質の夏季実測調査	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	金勲 成旻起 李晟在 李承珉 田淵誠一 谷英明 窪田圭佑 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 15 クロスクリーニングに関する室内空気質実大実験	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	西村栄利子 青木泰輔 谷英明 東田浩毅 窪田圭佑 金勲 田辺新一
	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 16 集合住宅における 3 種の換気条件における換気量実測	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	東田浩毅 青木泰輔 谷英明 西村栄利子 窪田圭佑 金勲 田淵誠一 田辺新一 村江行忠 浅井靖史

種類別	題名、	発表・発行掲載誌名、	発表・発行年月日、	連名者
講演 (国内)	パッシブ測定法用いた室内空気質評価 その 17 化学物質放散量簡易測定法の開発	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	窪田圭佑 <u>金勲</u> 田淵誠一 石川祐子 長谷川あゆみ 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 18 CO2 一定濃度法を用いた戸建て住宅 実測	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	柏原誠一 吉田和之 田淵誠一 窪田圭佑 東田浩毅 <u>金勲</u> 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 19 PFT 法を用いた換気量簡易測定法検討 実測	日本建築学会大会 学術講演概要集	2005 年 9 月	田淵誠一 窪田圭佑 東田浩毅 <u>金勲</u> 吉田和之 柏原誠一 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 12 韓国集合住宅における室内空気質の 夏季実測調査及び数値解析	空気調和・衛生工 学会学術講演会講 演論文集	2005 年 8 月	<u>金勲</u> 李承珉 李晟在 成旻起 東田浩毅 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 11 韓国における室内空気質対策及び実 態について (冬季)	空気調和・衛生工 学会学術講演会講 演論文集	2004 年 9 月	<u>金勲</u> 成旻起 李晟在 李承珉 田淵誠一 青木泰輔 谷英明 西村栄利子 田辺新一
	パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その 13 韓国集合住宅における室内空気質の 実測調査 (冬季)	日本建築学会大会 学術講演概要集	2004 年 8 月	<u>金勲</u> 成旻起 李晟在 李承珉 田淵誠一 青木泰輔 谷英明 西村栄利子 田辺新一
	シミュレーションによるハイブリッド空調シス テムの性能評価	空気調和・衛生工 学会学術講演会講 演論文集	2002 年 9 月	<u>金勲</u> 西村秀生 家崎直人 李晟在 田辺新一
	空気式床・壁放射暖房システムの冬季温熱環境 測定とシミュレーション	日本建築学会大会 学術講演概要集	2002 年 8 月	<u>金勲</u> 西村秀生 家崎直人 李晟在 田辺新一

ACKNOWLEDGMENT

謝辭

謝 辞

1981 年春小学校入学から 2009 年春博士号取得までの長い間、一人前にもなれず学校にばかりいる息子をただただ信じ、黙々と見守ってくださった故国の両親の愛と恩恵には感謝に堪えません。言葉では言い尽くせないその恩に比べたら微々たるものにすぎないが、この論文と学位を父と母に捧げます。

多忙な日程の中でも学位論文審査の労をお執りくださいました早稲田大学教授 長谷見雄二先生、早稲田大学教授 名古屋俊士先生、早稲田大学准教授 高口洋人先生には、温かきご支援と貴重なご意見・ご指導を賜りました。記して感謝申し上げます。

本学位論文が完成するまで、多くの方々にお世話になりました。この紙面をお借りして御礼申し上げます。

修士期間中の交換留学と博士課程を合わせ 6 年間ご指導を賜りました恩師の早稲田大学建築学科教授 田邊新一先生に心より感謝と敬意の意を申し上げます。田邊先生は学問の指導と研究への支援を惜しまず、時には親のような優しさを、時には兄のような親しさをもっていつも傍で微笑みながら見守ってくれる温かい存在でした。心より深く感謝しております。一人歩きにはまだ遙遠な弟子ではありますが、今後とも宜しく願い申し上げます。

また、今は退官されました修士時代の恩師である林正明先生（当時韓国国立釜山大学校建築工学科教授）に感謝の御礼を申し上げます。修士入学当時、専門分野における基礎の大切さから専門知識に至るまで優しく教えてくださった林先生の指導無しでは、多様な分野に興味を持って勉学に励める根幹を育むことはできませんでした。

留学に当たり博士課程 3 年間奨学金の支援を戴いた冠廷李種煥教育財団(관정 이종환 교육재단)の李種煥会長に心より厚くお礼申し上げます。冠廷李種煥教育財団からの経済的支援が無ければ留学することも、また学業と研究に専念することもできませんでした。また、財団職員の方々には大変お世話になりました。この紙面を借りて謝意を記します。財団からの支援は韓国社会からの支援であり、社会から恩恵を受けたことを忘れず、これまで学んできた知識と研究成果を社会のために使わせて頂きます。

そして、20L 小型チャンバーADPAC で有名な有限会社アドテックの有賀隆男様には、2003 年ソウルでの講演会で初めて会って以来ずっとお世話になっております。本論文に当たっても小型セルの製作・改良にご尽力くださいました。私と修士達の無理なお頼みにいつも優し

く暖かいご対応を頂き、心より感謝しております。

PFT 法の研究に関しては換気分野の専門家としてご指導鞭撻を戴いた国土技術政策総合研究所の田島昌樹様、いつも現場実測と一緒に測定をし、また面倒を見て頂いた旭化成ホームズ株式会社の柏原誠一様、松田克己様、戸田建設（株）技術研究所の村江行忠様、そして豊富な化学の知識で PFT 測定法の精度向上に画期的な突破口を開いてくださった旭化成株式会社の吉田和之様には実にお世話になり、また色々ご迷惑をおかけしました。心より深く感謝の御礼を申し上げます。

韓国では三星物産（株）建設部門技術本部技術研究所の李恩擇様、李承珉様、李晟在様、成旻起様にお世話になり、韓国における室内空気質関連の情報を戴き、また交流を広めることができました。記して謝意の意を表します。

早稲田大学建築学科田辺研究室の研究員、博士課程、修士課程の皆様にも大変お世話になりました。深く感謝致します。特に、同じ研究班として一緒に勉学と研究をしながら議論をしてくれた室内空気質班の田淵誠一様（当時早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、2004 年度卒業）、青木泰輔様、谷英明様、西村栄利子様、東田浩毅様（当時早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、2005 年度卒業）、窪田圭佑様（当時早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、2006 年度卒業）、亀尾研介様、田中祐輔様、常本祥子様、服部将志様（当時早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、2007 年度卒業）、黒澤百合子様、高野修一様、持田恵吾様（当時早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、2008 年度卒業）、岡田厚太郎様、仲村寿人様（早稲田大学大学院理工学研究科修士課程）に感謝致します。更に、班内でも同じ研究チームとして実験・実測を共にしてくれました田淵誠一様、東田浩毅様、窪田圭佑様、田中祐輔様、服部将志様、持田恵吾様の協力と努力があったからこそ本論文を纏めることができました。海を渡った異国の地でこのように素直で賢く、また心温かい後輩達に恵まれたことは大きな幸運であるとしか言い様がありません。ここに記して感謝申し上げます。

最後に、多くの方々からの指導鞭撻、応援激励と助言により本論文を纏めることができましたこと、ここに記して厚く御礼申し上げます。どうも有り難うございました。

己丑年 正月（2009 年 2 月）

金 勳